

Aalto yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

Jani Ahokas

AURINKOSÄHKÖTUOTANNON MAHDOLLISUUDET HELSINGIN KESKUSTAN ALUEELLA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 12.5.2014

Työn valvoja ja ohjaaja:
Professori Matti Lehtonen



Tekijä: Jani Ahokas		
Työn nimi: Aurinkosähkötuotannon mahdollisuudet Helsingin keskustan alueella		
Päivämäärä: 12.5.2014	Kieli: suomi	Sivumäärä: 8 + 64
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka		Koodi: S-18
Valvoja ja ohjaaja: Professori Matti Lehtonen		
<p>Tutkielmassa tarkasteltiin teoreettisesti jäähdytyksen tuottamista kiinteistöihin (valitut kulutuspisteryhmät) aurinkosähköpaneelien avulla Helsingin kaupunkiympäristössä. Tutkimuksessa hyödynnettiin jäähdytysenergian mitattuja kulutustietoja neljän kuukauden ajanjaksolla vuonna 2011. Keskeinen tutkimusteema oli: ”Voiko uusiutuvalla energiantuotannolla vastata kehittyvässä kaupunkiympäristössä kasvavaan sähköenergiatarpeeseen?”</p> <p>Varsinaisia tutkimuskysymyksiä olivat:</p> <ul style="list-style-type: none">- Onko kulutuspisteryhmien jäähdytyksen huipputehotunnin tarvitsema sähköteho mahdollista tuottaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla?- Voidaanko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa riittävästi jäähdytykseen auringonpaistettuna? Mahtuuko kiinteistön jäähdytystarpeen täyttävä aurinkosähköpaneelikenttä kiinteistön katolle, mikä sen pinta-ala on kulutuspisteissä? <p>Lisäksi arvioitiin aurinkosähköpaneelikentän soveltuvuutta tarkasteltavien kulutuspisteryhmien katoille jäähdytyksen huipputehotunteina sekä vertailtiin kahdella eri auringonpaistetunnilla saatuja aurinkosähköpaneelikentän pinta-aloja keskenään. Kaukojäähdytysenergian kulutustietoja hyödynnettiin laskettaessa tarvittavien aurinkosähköpaneelien sähkötehoa suhteutettuna jäähdytysenergian huipputehotuntiin. Näin saatiin selville aurinkosähköpaneelikenttien tarvittavat pinta-alat ja voitiin tarkastella onko kulutuspisteryhmien jäähdytystä (sähkötehon tarve) mahdollista toteuttaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla. Tutkimuksen teoreettisena viitekehysenä ja menetelmänä toimii Hannu-Pekka Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli.</p> <p>Tutkimuksessa todettiin, että jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä mahtuu tarkastelupisteistä toimistorakennusten ja asuinkiinteistöjen katoille. Tarkasteltujen kauppakeskusten katoille jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä ei mahdu.</p>		
Avainsanat: Aurinkosähkö, aurinkosähköpaneeli, kaukojäähdytys, huipputehotunti, ilmastomuutos, Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli		

Author: Jani Ahokas		
Title: Possibilities of photovoltaic power generation in the urban environment of Helsinki		
Date: 12.5.2014	Language: Finnish	Number of pages: 8 + 64
Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship: Power Systems and High Voltage Engineering		Code: S-18
Supervisor and instructor: Professor Matti Lehtonen, D. Sc. (Tech.)		
<p>The purpose of this thesis was to examine the possibility of using a photovoltaic system in generating the cooling power to the premises in the city environment of Helsinki. The theme was approached theoretically by using Hannu-Pekka Hellman's Photovoltaic power generation modeling. The interest of this study was in whether the sufficient photovoltaic system would fit on the rooftop areas of the chosen premises (there were three categories of premises: residential building, shopping center and office building).</p> <p>The conclusion was that a photovoltaic system sized by the peak power consumption can be fitted to the rooftop areas of residential buildings and office buildings, but the system wouldn't fit to the rooftop area of a shopping center.</p>		
<p>Keywords:</p> <p>Solar photovoltaic, solar panels, district cooling, hourly peak consumption, climate change, Hannu-Pekka Hellman's Photovoltaic power generation modeling</p>		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty opinnäytetyönä Aalto yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun sähkötekniikan ja automaation laitokselle.

Haluan kiittää työni valvojaa ja ohjaajaa professori Matti Lehtosta saamastani tuesta ja neuvoista tämän diplomityön tekemisessä. Lisäksi haluan kiittää avusta työn tekemisen eri vaiheissa vanhempaa asiantuntijaa Kalle Hakosta Helsingin Energiasta sekä TkT Pirjo Heineä Helen Sähköverkko Oy:stä.

Suuri kiitos vaimolleni Anulle kannustuksesta ja tuesta opintojeni aikana. Aaro ja Erno, olette olleet isälle hienoja esimerkkejä siitä, miten opetellaan uutta.

Espoossa 12.toukokuuta 2014

Jani Ahokas

SISÄLLYSLUETTELO

Diplomityön tiivistelmä	ii
Abstract of Master's Thesis	iii
Alkusanat	iv
Sisällysluettelo	v
Symboli- ja lyhennysluettelo	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkielman tarve ja tausta lyhyesti	1
1.2 Tutkimusongelma, teoreettinen viitekehys ja rajaukset.....	2
1.3 Tutkielman rakenne	3
2 Ilmastomuutokseen liittyvät kansainväliset ja kansalliset sitoumukset.....	4
2.1 Ilmastomuutoksen määritelmä	4
2.2 Ilmastomuutokseen liittyvien ongelmien ratkaisu YK:ssa	6
2.3 Euroopan Unionin energiapolitiikka ilmastomuutoksen hillitsemiseksi	7
2.4 Suomen kansallinen strategia ilmastomuutoksen hillitsemiseksi	8
2.5 Helsingin kaupungin strategia ilmastomuutosta vastaan	9
2.5.1 Helsingin sähkönkulutus ja kasvihuonekaasupäästöt	10
2.6 Rakennusten energiatehokkuutta koskevat säädökset ohjaavat uusiutuvien energialähteiden käyttöön	13
3 Aurinkoenergia uusiutuvana energialähteenä	14
3.1 Aurinko energialähteenä	14
3.2 Aurinkosähköpaneelit	16
3.3 Aurinkosähköpaneelien asennus ja visuaaliset sovellukset	18
3.4 Aurinkovoimalat lyhyesti	20
4 Jäähdytys.....	21
4.1 Rakennusten jäähdytysenergian tarve.....	21

4.2 Jäähdytysenergian jakelu keskitetysti ja hajautetusti.....	22
5 Tutkimusaineisto, tutkimusmenetelmät, Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli	24
5.1 Hellmanin malli aurinkosähkötuotannosta	24
5.1.1 Auringon teoreettinen kokonaissäteily	25
5.1.2 Aurinkosähköpaneelin tuotantomalli	31
5.1.3 Hellmanin aurinkosähkötuotantomallin ytimessä havaintodata ja regressiomalli.....	32
5.2 Kulutuspisteryhmissä mitattu jäähdytysenergia ja sähkön kokonaiskulutus	34
5.3 Aurinkosähköpaneelit tarkastelluissa kulutuspisteryhmissä.....	35
5.3.1 Aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla	37
5.3.2 Jäähdytysenergian tuotanto aurinkosähköpaneelilla tunteina, joina aurinko säteilee ($p_{index} > 0$).....	39
6. Tutkimustulokset	41
6.1 Aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla	41
6.2 Jäähdytysenergian tuotanto auringonpaistetunteina	45
6.3 Aurinkosähköpaneelikentän pinta-alan soveltuminen kulutuspisteiden katoille jäähdytyksen huipputehotunteina	48
7. Johtopäätökset.....	49
Lähdeluettelo	52
A p_{index} (W/m^2), $t_{ssh}=0,437$	60
B p_{index} (W/m^2), $t_{ssh}=1$	61
C Jäähdytysteho (kW) tunneittain.....	62
D Aurinkosähköpaneeli Q.Pro BLK-G3 250 W_p	63
E Aurinkosähköpaneelikentältä tuotetun sähkön ja kulutuspisteryhmän mitatun kokonaissähkönkulutuksen suhde (prosentteina).....	64

Symboli- ja lyhennysluettelo

A_A	aurinkosähköpaneelin pinta-ala	[m ²]
E	aurinkoajan korjaustermi	
G_b	suora auringon säteily	[W/m ²]
G_d	auringon hajasäteily	[W/m ²]
G_{glob}	teoreettinen auringon kokonaissäteily	[W/m ²]
G_{on}	auringonsäteilyn määrä ilmakehän ulkopuolella	[W/m ²]
G_{sc}	aurinkovakio	[W/m ²]
H	auringon säteilyenergia	[Wh/m ²]
L_{loc}	tarkastelijan pituusaste	[°]
L_{st}	paikallisen aikavyöhykkeen pituuspiiri	[°]
m	suhteellinen optinen ilmamassa	
N	päivän järjestysnumero	
p_{index}	auringon säteilytehon indeksi	
P_j	jäähdytyksen huipputehotunnille tarvittava sähköteho	[W]
$P_{jäähdytys}$	jäähdytyksen huipputehotunnin arvo	[W]
P_{max}	aurinkosähköpaneelin nimellisteho	[W]
T_C	aurinkosähköpaneelin lämpötila	[°C]
T_L	Linke sameus-kerroin	
T_{STC}	ulkoilmalämpötila	[°C]
t_{ssh}	auringonpaistetunti	
α_s	auringon korkeuskulma	[rad]
α_s^{true}	todellinen auringon korkeuskulma	[rad]
β	aurinkopaneelin kallistuskulma	[rad]
β_p	tehon lämpötilakerroin	[%/°C]
γ	aurinkosähköpaneelin atsimuutti	[rad]
γ_s	auringon atsimuutti	[rad]
δ	dekliinaatiokulma	[rad]
δ_R	Rayleighin optinen tiheys	
η	hyötysuhde	[%]
η_{eff}	aurinkosähköpaneelin hyötysuhde	[%]
θ_i	säteilyn tulokulma	[rad]
ϕ	leveysaste	[rad]

ω tuntikulma [rad]

Lyhenteet

CO₂-ekv. hiilidioksidiekvivalentti on suure, jonka avulla voidaan yhteismitallistaa eri kasvihuonekaasujen päästöt. Hiilidioksidiekvivalentin laskemista varten kasvihuonekaasujen päästöt kerrotaan niiden GWP-kertoimilla.

Helen Helsingin Energia

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

NOCT Normal Operating Cell Temperature

STC Standard Test Conditions

UNEP United Nations Environment Program

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change

YK Yhdistyneet kansakunnat

1 Johdanto

Johdannossa kuvataan tutkielman tarve ja tausta lyhyesti. Lisäksi esitellään tutkimusongelma, rajaukset ja keskeinen teoreettinen viitekehys. Lopuksi kuvataan tutkielman rakenne ja sisältö.

1.1 Tutkielman tarve ja tausta lyhyesti

Tutkielmassa tarkastellaan jäähdytyksen tuottamista kiinteistöihin aurinkosähköpaneelien avulla Helsingin kaupunkiympäristössä. Viime vuosikymmeninä kiinnostus uusiutuvia energialähteitä kohtaan on kasvanut merkittävästi ilmastomuutoksen liittyvän keskustelun vuoksi. Lähes kiistatta ilmastotieteilijöiden keskuudessa vallitsee konsensus: ilmastomuutos on todellinen, ilmasto lämpenee maapallolla ja lämpeneminen on merkittävästi ihmisten aiheuttamaa. Ilmastomuutos on ilmiönä ulottuvaisuudessaan ainutlaatuinen: maapallon ilmakehän tila koskettaa kaikkia valtioita ja ihmisiä yhteiskuntatilanteista riippumatta. Globaalein ilmastositomuksin valtioita veloitetaan vähentämään kasvihuonepäästöjä. Tämä vaatimus heijastuu yksittäisten valtioiden energia- ja ympäristöpolitiikan kautta myös kuntatason energia- ja ympäristöstrategioihin. (Broome 1992, s. 12)

Rakennusten lämpöenergiankulutus on viime vuosikymmeninä laskenut, mutta sähköenergian kulutuksen trendi on ollut päinvastainen (Zaiseva 2012, s. 11). Haastetta kasvattaa lisääntyvä rakennuskanta. Helsingin rakennettu pinta-ala on kasvanut 31 % vuodesta 1990 (Lounasheimo 2013, s. 32) vuoteen 2012 mennessä. Myös jäähdytysenergian kysyntä on kasvussa (Energiateollisuus 2013a, s. 2). Tutkielman tarkastelukaupungissa Helsingissä, kasvihuonekaasupäästöjen trendi on ollut pääsääntöisesti kasvava (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012b).

Näiden edellä mainittujen seikkojen vuoksi tutkimuskysymys on ajankohtainen ja merkittävä. On tärkeää tarkastella keinoja, joilla rakennusten energiankäyttötäpeesta osa voitaisiin tuottaa paikallisesti uusiutuvilla energialähteillä.

1.2 Tutkimusongelma, teoreettinen viitekehys ja rajaukset

Tutkielmassa tarkastelu on rajattu aurinkosähköenergiaan. Aurinkosähkö on tapa tuottaa uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa sähköä lähellä kulutuspistettä kaupunkiympäristössä. Tutkielmassa tarkasteltiin teoreettisesti kuinka aurinkosähköpaneeleita voidaan hyödyntää valittujen kulutuspisteryhmien (kiinteistöt) jäähdytyksen tarvittavan energian tuottamiseen Helsingissä. Tutkielmaan valittiin Helsingin kantakaupungista kulutuspisteryhmät, joiden jäähdytysenergian mitattuja kulutustietoja käytettiin neljän kuukauden ajanjaksolla vuonna 2011. Keskeinen tutkimusteema oli:

- Voiko uusiutuvalla energiantuotannolla vastata kehittyvässä kaupunkiympäristössä kasvavaan sähköenergiatarpeeseen?

Varsinaisia tutkimuskysymyksiä olivat:

- Onko kulutuspisteryhmien jäähdytyksen huipputehotunnin tarvitsema sähköteho mahdollista toteuttaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla?
- Voidaanko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa riittävästi jäähdytykseen auringonpaistetunteina?
- Mahtuuko kiinteistön jäähdytystarpeen täyttävä aurinkosähköpaneelikenttä kiinteistön katolle, mikä sen pinta-ala on kulutuspisteissä?

Tämän lisäksi arvioitiin aurinkosähköpaneelikentän soveltuvuutta tarkasteltavien kulutuspisteryhmien katoille jäähdytyksen huipputehotunteina sekä vertailtiin kahdella eri auringonpaistetunnilla saatuja aurinkosähköpaneelikentän pinta-aloja keskenään.

Kaukojäähdytysenergian kulutustietoja hyödynnettiin laskettaessa tarvittavien aurinkosähköpaneelien sähkötehoa suhteutettuna jäähdytysenergian huipputehotuntiin. Näin saatiin selville aurinkosähköpaneelikenttien tarvittavat pinta-alat ja voitiin tarkastella onko kulutuspisteryhmien jäähdytystä (sähkötehon tarve) mahdollista toteuttaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla.

Tutkimuksen teoreettisena viitekehyksenä ja menetelmänä toimii Hannu-Pekka Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli. Hellman perusti aurinkosähkötuotantomallinsa Rigollierin et al. tavalle laskea auringon teoreettinen kokonaissäteily (G) pilvettömällä säällä. Tätä menetelmää Hellman hyödynsi tutkimuksessaan olevassa regressiomallissa. (Hellman 2011, s. 2, 8). Lisäksi Hellman perustaa mallinsa Mattei et al.:n tarkastelulle yksinkertaisesta aurinkosähköpaneelin tuotantomallista. Siinä huomioidaan mm. ulkolämpötila ja auringon kokonaissäteilyn vaikutus aurinkokennon lämpötilaan (Hellman 2011, s. 11).

Tässä tutkielmassa tarkastellaan uusiutuvista energialähteistä vain aurinkoenergian sähköntuotantoa, koska se on yksi relevantti tapa tuottaa energiaa kaupunkiympäristössä. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin aurinkosähköenergian varastointi. Ajallinen tarkastelu rajattiin neljään kuukauteen (touko–elokuu), koska kyseiset kuukaudet ovat Suomessa keskilämpötiloiltaan lämpimimpiä.

Ympäristöön kohdistui myös useita rajauksia. Tutkielmassa oletettiin, että kulutuspisteiden tasakatto on kokonaisuudessaan käytössä aurinkopaneeleille. Lisäksi oletettiin, että viereiset rakennukset, puut tai muut sellaiset esteet eivät aiheuta varjoa aurinkopaneeleille. Kiinteistön sijainnin merkitystä ei myöskään arvioitu tutkielmassa.

Tutkielmassa ei tarkasteltu tuulen viilentävää vaikutusta aurinkosähköpaneeliin. Lukijan tulee huomioida myös, että mikäli aurinkosähkötuotantoa haluttaisiin tarkastella talvikuukausina, tulisi huomioida myös lumen vaikutus sähkötehoon. Lumi ja jää aiheuttavat sähkötehon pienentymisen. Sama vaikutus on paneelin likaisuudella. (Ramboll Oy 2013, s. 30) Lisäksi oletettiin, että aurinkosähköpaneeli toimii kokoajan moitteettomasti maksimitehopisteessä.

1.3 Tutkielman rakenne

Tässä alaluvussa kuvataan tutkielman rakenne lyhyesti. Tutkielman johdannossa tarkastellaan aiheen syntyä, työn taustaa ja siihen liittyvää tutkimuskirjallisuutta sekä tutkimuskysymystä yleisellä tasolla. Toisessa luvussa käsitellään ilmastonmuutosta siihen liittyvine kansainvälisine ja kansallisine sopimuksineen sekä strategioineen.

Luvussa tarkastellaan myös Helsingin kaupunkia kasvihuonepäästöjen aiheuttajana ja toisaalta kaupungin ilmastostrategiaa. Kolmannessa luvussa paneudutaan aurinkosähköenergiaan. Neljännessä luvussa sivutaan jäähdytysenergianratkaisuja. Varsinaiset tutkimusmenetelmät, tutkimusaineisto, tutkimuksen toteutus ja keskeinen teoreettinen viitekehys esitellään tutkielman viidennessä luvussa. Kuudennessa luvussa esitellään keskeiset tutkimustulokset ja seitsemännessä luvussa johtopäätökset.

2 Ilmastonmuutokseen liittyvät kansainväliset ja kansalliset sitoumukset

Ilmastonmuutos on ilmiönä ulottuvaisuudessaan ainutlaatuinen: maapallon ilmakehän tila koskettaa kaikkia valtioita ja ihmisiä yhteiskuntatilanteista riippumatta. Globaalein ilmastositoumuksin valtioita veloitetaan vähentämään kasvihuonepäästöjä. Tämä vaatimus heijastuu yksittäisten valtioiden energia- ja ympäristöpolitiikan kautta myös kuntatason energia- ja ympäristöstrategioihin.

2.1 Ilmastonmuutoksen määritelmä

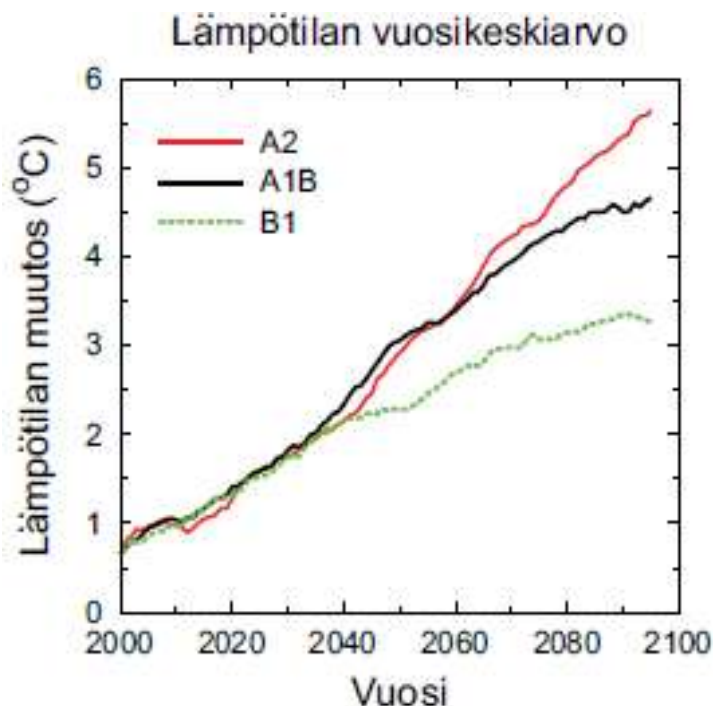
Ilmastonmuutos on monitahoinen ja globaali ympäristöongelma, jolla on erilaisia alueellisesti ja ajallisesti vaikuttavia seuraamuksia. YK:n ilmastonmuutosta koskevassa puitesopimuksessa (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), ilmastonmuutos määritellään ilmastojärjestelmässä tapahtuviksi pitkän aikavälin muutoksiksi, jotka syntyvät suorasti tai epäsuorasti ihmisten toiminnasta ja muuttavat ilmastoa enemmän kuin luonnollisesti ilmastossa tapahtuvat muutokset (United Nations 1992, s. 3).

Lähes kiistatta ilmastotieteilijöiden keskuudessa vallitsee konsensus: ilmastonmuutos on todellinen, ilmasto lämpenee maapallolla ja lämpeneminen on merkittävästi ihmisten aiheuttamaa. Ilmastonmuutoksella on vaikutuksia sääolosuhteisiin ja ekosysteemeihin. Jo vuosikymmeniä on arvioitu, että seuraukset ”tulevat varmasti olemaan pitkäaikaisia, lähes varmasti merkittäviä, luultavasti ei-toivottavia ja mahdollisesti katastrofaalisia”

(Broome 1992, s. 12). Ilmastomuutoksen vaikutukset voi jo huomata meren pinnan nousuna, aavikoitumisena, sään ääri-ilmiöiden lisääntymisenä, epätavallisen kuumina tai kylminä vuoden aikoina ympäri maailmaa. Ilmastomuutoksen vaikutukset ovat pitkäkestoisia ja näkyvät viiveellä. (Flannery 2006, s. 43–50)

Kansainvälisesti ilmastomuutokseen liittyvää tutkimustietoa kokoaa ja julkaisee ilmastomuutospaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC:n tavoitteena on tukea kansallista ja kansainvälistä ilmastopoliittista päätöksentekoa. Kansallisen ja kansainvälisen ilmastopoliittisen päätöksenteon tueksi IPCC on julkaissut viisi laajaa arviointiraporttia (Assesment Report), jotka ovat kokoomateoksia ilmastotutkimuksen eri osa-alueilta. Arviointiraportit ovat koonneet IPCC:n tutkijaryhmät keräämällä ja arvioimalla julkaistua tieteellistä tutkimustietoa. IPCC ei itse tee tutkimusta tai mittauksia ilmastoon liittyen.

Suomen Ilmatieteenlaitos tuotti IPCC:n vuonna 2007 ilmestyneen neljännen arviointiraportin kehityspolkuja vastaavat tarkastelut Suomen olosuhteisiin. Tarkastelussa huomioitiin kolme vaihtoehtoista kasvihuonekaasuskenaariota; suuret kasvihuonekaasupäästöt (A2), melko suuret kasvihuonekaasupäästöt (A1B) ja pienet kasvihuonekaasupäästöt (B1). Tarkastelun mukaan ilmastonlämpötilan vuosikeskiarvo koko Suomessa nousisi optimistisimman arvion (B1) mukaan kolme astetta ja pessimistisemmän arvion (A2) mukaan melkein kuusi astetta vuoteen 2100 mennessä, ks. kuva 1. Sademäärä kasvaisi vuoteen 2100 mennessä 12 %:sta aina 22 %:in asti. (Jylhä et al. 2009, s. 37–38)



Kuva 1. Lämpötilan muutos Suomessa eri kehitysskenaarioissa (Jylhä et al. 2009, s. 38)

Vuonna 2014 julkaistun IPCC:n viidennen arviointiraportin mukaan riippuvuus fossiilisista polttoaineista olisi katkaistava välittömästi, jotta välttyttäisiin ilmastomuutoksen merkittäviltä vaikutuksilta. Ilmestynyt arviointiraportti perustuu tieteellisiin tutkimuksiin vuosilta 2007–2013. Raportissa todettiin, että uusiutuvanenergian tuotanto tulisi kolmin- nelinkertaistaa vuoteen 2050 mennessä, muuten maapallo lämpenee enemmän kuin kaksi astetta, jota on pidetty kriittisenä rajana. Merkittävimpänä tekijänä muutoksessa mainittiin kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 40–70 %:a vuoden 2010 tasoon verrattuna. Raportti suosittelee, että fossiiliset polttoaineet korvataan bio-, tuuli- ja aurinkoenergialla sekä vesivoimalla. (Saavalainen 2014b, A8)

2.2 Ilmastomuutokseen liittyvien ongelmien ratkaisu YK:ssa

Ilmastomuutoksen ympärillä käydään laajaa poliittista, yhteiskunnallista, teknistä ja taloudellista keskustelua. Ympäristöongelmien kansainvälinen politisoituminen on nostanut ne osaksi valtiollista poliittista keskustelua. Ympäristökysymykset nousivat kansainväliselle agendalle, kun YK:n ensimmäinen ympäristökonferenssi järjestettiin vuonna 1972, jolloin luotiin YK:n ympäristöohjelma UNEP (United Nations

Environment Program). YK:n puitteissa tehdyt sopimukset ovat merkittävä osa kansainvälistä ympäristöpolitiikkaa. Myös ilmastonmuutosta koskeva puitesopimus (UNFCCC) neuvoteltiin osana YK-järjestelmää vuonna 1992. Vuonna 1997 puitesopimukseen lisättiin Kioton pöytäkirja (Kyoto Protocol), joka astui voimaan vuonna 2005. YK:n ilmastokonferenssissa vuonna 2009 tavoitteena oli uuden ilmastopimuksen luominen vuoden 2012 jälkeiselle ajalle. Huippukokouksessa ei kuitenkaan saatu aikaiseksi laillisesti sitovaa sopimusta. Vuonna 2012 järjestettiin ”Rio+20” kestävän kehityksen huippukokous Rio de Janeirossa, jossa ei myöskään onnistuttu sopimaan jäsenvaltioita sitovista tavoitteista. (Yhdistyneet kansakunnat 2013, verkkosivu)

Ilmasto- ja ympäristökokouksiin oman haasteensa tuovat teollistuneiden ja kehitys- ja kehittyvien maiden vastakkainasettelu. Kehitys- ja kehittyvät maat kokevat teollisuusmaiden asettamat tavoitteet esteenä maidensa talouskasvulle. YK:n ilmastokokouksia kritisoidaan usein tehottomiksi, mutta Kortetmäen mukaan voitaneen argumentoida, että ”toistaiseksi ilmastokokouksille ei ole löytynyt vaihtoehtoisia kansainvälisiä mekanismeja, joiden voitaisiin perustellusti uskoa olevan tehokkaampia ja riittävän legitimitetin saavuttavia” (Kortetmäki 2013, s. 81).

2.3 Euroopan Unionin energiapolitiikka ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi

Euroopan Unioni (EU) esitteli vuoteen 2030 ulottuvat uudet tavoitteet ilmasto- ja energiapolitiikalle tammikuussa 2014. Selkeimpinä tavoitteina nousevat esille kasvihuonekaasujen vähentäminen 40 %:lla vuoden 1990 tasosta sekä uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen vähintään 27 %:in. (Euroopan komissio 2014, lehdistötiedote) Aikaisemmat vuonna 2008 EU:n asettamat ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteet olivat maltillisemmat: vuoteen 2020 mennessä tähdättiin kasvihuonekaasujen osalta 20 %:n ja uusiutuvien energialähteiden osalta 20 %:n vähennyksiin. Lisäksi tavoitteena vuodelle 2020 oli energiatehokkuuden parantaminen 20 %:lla (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013, s. 11). EU:n pitkän aikavälin tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 80–95 %:lla vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna (European Commission 2011, s. 3).

2.4 Suomen kansallinen strategia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi

Suomen energia- ja ilmastopolitiikka toteutetaan kansainvälisten ja EU:ssa määriteltyjen tavoitteiden mukaisesti. Kansallinen energia- ja ilmastopolitiikka perustuu ministeriöiden yhteistyöhön. Kukin ministeriö vastaa hallinnonalansa osalta energia- ja ilmastostrategioiden valmistelusta, toimeenpanosta ja vaikutusten arvioinnista sekä niiden edellyttämistä selvityksistä. Hallitustasolla valmistelua johtaa energia- ja ilmastopolitiikan työryhmä, jonka työtä Työ- ja elinkeinoministeriö koordinoi. Viimeisin kansallinen energia- ja ilmastostrategia hyväksyttiin eduskunnassa joulukuussa 2013. Lisäksi ilmastonmuutoksen hidastaminen huomioidaan vuonna 2006 Suomessa hyväksytyssä uudessa kestävän kehityksen strategiassa. (Härmälä et al. 2014, B11; Yhdistyneet kansakunnat 2013, verkkosivu)

Valmistelussa oleva strategian, ”Suomen energia- ja ilmastotiekartta vuoteen 2050”, lähtökohtana on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 80–95 %:lla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä Euroopan Unionin tavoitteiden mukaisesti. Tiekartan tavoitteena on varmistaa Suomen energia- ja ilmastopolitiikan pitkäjänteisyys. (Härmälä et al. 2014, B11)

Strategiassa otetaan huomioon kustannustehokkuus, energiaomavaraisuuden lisääminen sekä riittävän ja kohtuuhintaisen sähkönsaannin turvaaminen. Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on varmistaa vuodelle 2020 asetettujen kansallisten tavoitteiden saavuttaminen. EU:sta johdetut tavoitteet vuodelle 2020 olivat kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, uusiutuvan energian edistäminen sekä energiankäytön tehostaminen. Suomi on saavuttamassa EU:n asettamat tavoitteet ns. perusskenaarion mukaan. Perusskenaariolla arvioidaan toimenpiteiden vaikutusta tulevaisuuden kehitykseen. Ns. tarkennettu perusskenaario koostuu perusskenaariosta ja muutamista lisätoimenpiteistä, jotka tulevat ministeriöiden toteutettaviksi. Lisätoimenpiteenä tarkennetussa perusskenaariossa mainitaan muun muassa vaatimus hyödyntää lämpöpumppujen, aurinkolämmön ja kiinteistöjen energiatehokkuuden tarjoamat mahdollisuudet sekä edistää kiinteistökohtaista pientuotantoa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013a, s. 16–17)

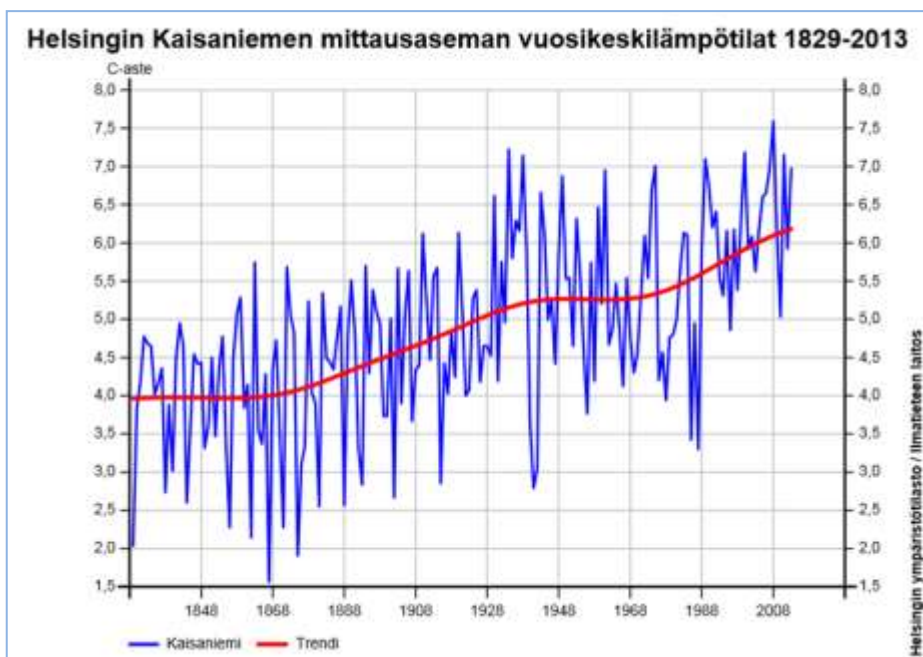
Kansallisessa energia- ja ilmastostrategian taustaraportissa arvioidaan, että sähkön pientuotanto tulee lisääntymään hiukan. Lisäksi siinä arvioidaan, että sähkön pientuotanto koostunee yksityishenkilöiden pientuulivoimalaitoksista sekä pienimuotoisista aurinkoenergalaitoksista. Raportti tuo esiin, että pientuotannon vaikutus energiantuotantoon alueellisesti voi kuitenkin olla merkittävä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013b, s. 39)

2.5 Helsingin kaupungin strategia ilmastonmuutosta vastaan

Ilmastonmuutokseen liittyvien ongelmien ratkaisu edellyttää globaalien ja kansallisten toimien lisäksi paikallisia strategioita ja ratkaisuja. Helsingin kaupunki on sitoutunut kasvihuonepäästöjen vähentämiseen monilla päätöksillä. Helsingin kaupunginvaltuusto hyväksyi energiapoliittisen selonteon vuonna 2008, jossa kaupungin tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 %:lla vuoden 1990 tasosta ja tuottaa energiasta 20 % uusiutuvalla energialla vuoteen 2020 mennessä. Helsingin kaupunki tavoittelee myös energiatehokkuuden parantamista vähintään 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. (Helsingin kaupunki 2008, s. 19–25; Helsingin kaupunki 2012, s. 4)

”Strategiaohjelmassaan 2013–2016” Helsingin kaupunki asetti aiempaa haastavamman tavoitteen kasvihuonekaasupäästöille: se pyrkii vähentämään kasvihuonekaasuja 30 %:lla vuoteen 2020 mennessä (Helsingin kaupunki 2013, s. 21). Helsingin kaupungin pitkän aikavälin tavoitteena, vuoteen 2050 mennessä, on hiilineutraali energiantuotanto (Helsingin kaupunki 2012, s. 4).

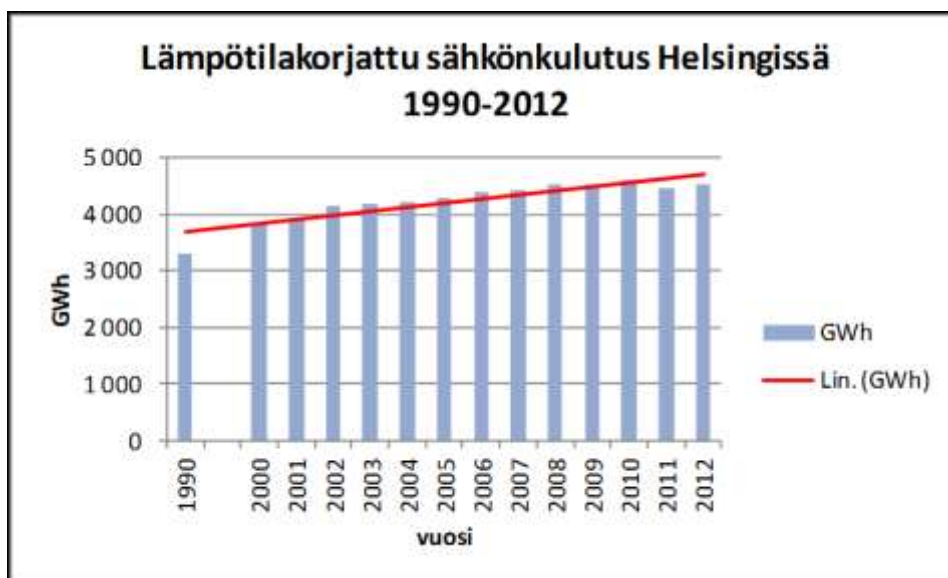
Helsingin kaupungin päätökset ovat tärkeitä, koska ilmastonmuutoksen alueelliset vaikutukset ovat nähtävissä mm. Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla tehdyissä lämpötilahavaintosarjoissa. Kuvasta 2 voidaan havaita, että vuosikeskilämpötila on noussut Helsingissä.



Kuva 2. Helsingin Kaisaniemen mittausaseman vuosikeskilämpötilat vuosina 1829–2013 (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012c, verkkokuva)

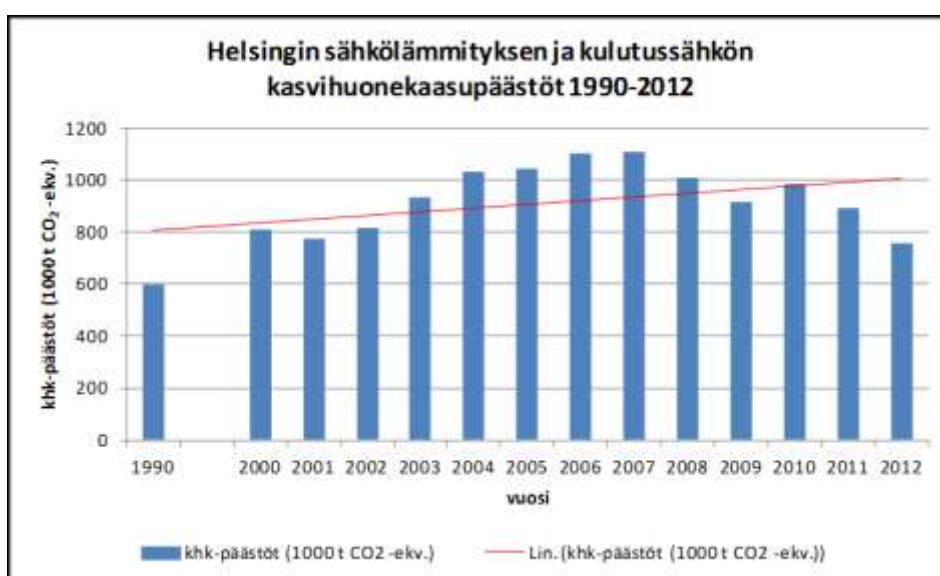
2.5.1 Helsingin sähkönkulutus ja kasvihuonekaasupäästöt

Problematiikkaa aiheuttaa Helsingin sähkönkulutuksen vuodesta 1990 lähtien kasvava trendi, jonka kehitystä pääsääntöisesti myös kasvihuonekaasupäästöjen määrä on seurannut (Lounasheimo 2013, s. 37). Kuva 3 kuvaa Helsingin alueen sähköenergian kulutuksen kasvavaa trendiä. Vuonna 2012 sähkönkulutus oli edellisvuotta 1,3 % korkeampi ja verrattuna vuoteen 1990 se oli 36 % korkeampi (Lounasheimo 2013, s. 37). Sähkönkulutus vuonna 2012 koostui seuraavista kulutusluokista: yksityinen kulutus 31,8 % (asuinhuoneistot ja asuinkiinteistöt), jalostus 7,3 % (teollisuus ja rakentaminen), palvelu 51,2% ja julkinen kulutus 9,7% (liikennevälineet ja yhdyskuntahuolto). (Tietokeskus 2013, s. 187)



Kuva 3. Lämpötilakorjattu sähkönkulutus Helsingissä vuosina 1990 - 2012 (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012a, tilastokaavio)

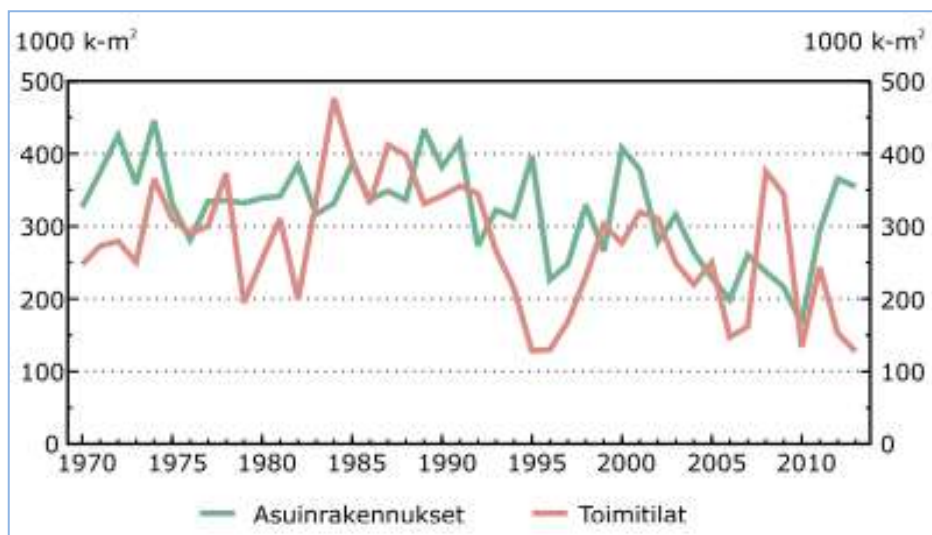
Helsingin kasvihuonekaasupäästöjen trendi on ollut pääsääntöisesti kasvava, heijastellen kaupungin sähkönkulutuksen vuodesta 1990 kasvavaa trendiä. Aivan viimeisinä vuosina sähkönkulutuksen trendissä on huomattavissa pieniä muutoksia, kuten kuvasta 4 voidaan nähdä (Helsingin ympäristötilasto 2012b). Suurin osa Helsingin kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2012 aiheutui rakennusten lämmittämisestä kaukolämmöllä (54 %), liikenteestä (22 %) ja kulutussähköstä (21 %). Loppuosan kasvihuonepäästöistä Helsingissä aiheuttivat öljylämmitys, teollisuus ja työkoneet, jätteiden käsittely ja maatalous. (Lounasheimo 2013, s. 30-98)



Kuva 4. Helsingin sähkölämmityksen ja kulutussähkön kasvihuonekaasupäästöt vuosina 1990–2012 (Helsingin kaupungin ympäristökeskus 2012b, tilastokaavio)

Zaiseva on haastatellut tutkimuksessaan Helsingin kaupungin rakennusviraston johtavaa energia-asiantuntija Sirpa Eskelistä, jonka mukaan Helsingin kaupungin kokonaisenergiasta noin 80 % kuluu kaupungin omistamissa rakennuksissa. Rakennusten lämpöenergiankulutus on viime vuosikymmeninä laskenut, mutta sähköenergian kulutuksen trendi on ollut päinvastainen. Helsingin kaupungin rakennussektorin sähköenergian kulutus oli vuonna 2001 415 GWh, kun vuonna 2010 vastaava luku oli jo 473 GWh. Kun edellisissä luvuissa huomioidaan kaupungin rakennuskannan kehitys, saadaan vastaaviksi sähköenergian ominaiskulutuksiksi 60 kWh/m² vuonna 2001 ja 68 kWh/m² vuonna 2010. Vuoden 2010 sähköenergian ominaiskulutus on siis 13,3 % suurempi kuin vuoden 2001 sähköenergian ominaiskulutus. (Zaiseva 2012, s. 11)

Haastetta lisää lisääntyvä rakennuskanta. Helsingin rakennettu pinta-ala on kasvanut 31 % vuodesta 1990. Vuonna 2012 Helsingin rakennuksista kerrosneliöinä laskien lähes 90 % lämmitettiin kaukolämmöllä, 6 % sähköllä ja 5 % öljyllä (Lounasheimo 2013, s. 32). Vuonna 2013 valmistuneiden asuinrakennusten ja toimitilojen määrä ei ollut kuin 7 % pienempi kuin vuonna 2012 ja 5 % pienempi kuin vuosien 2008–2012 valmistuneen tuotannon keskiarvo, ks. kuva 5. (Vihavainen 2014, s. 3)



Kuva 5. Helsingissä valmistunut rakennustuotanto vuosina 1970–2013 (Vihavainen 2014, s. 3)

Helsingin Energia (Helen) on merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen tuottaja kaupungissa, koska sen kaukolämmön tuotanto perustuu pääasiallisesti maakaasun ja kivihiilen käyttämiseen energianlähteinä. Vuonna 2012 kaukolämmön päästöt olivat 46

% Helsingin kokonaispäästöistä (Lounasheimo 2013, s. 33). Helsingin kaupunki haluaa olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, näin ollen Helsingin kaupunginvaltuusto on vuonna 2010 hyväksynyt Helsingin Energian oman kehitysohjelman, jossa on sama tavoite. Helsingin Energian tavoitteena on hiilineutraali energiantuotanto vuoteen 2050 mennessä. (Helsingin Energia 2014, verkkosivu)

2.6 Rakennusten energiatehokkuutta koskevat säädökset ohjaavat uusiutuvien energialähteiden käyttöön

Euroopan Unioni ohjaa jäsenvaltioitaan uusiutuvien energialähteiden käyttöön uudisrakentamisessa. Euroopan Unioni on säätänyt direktiivin rakennusten energiatehokkuudesta vuonna 2010. Uudessa energiatehokkuusdirektiivissä säädetään energiatehokkuustodistuksesta. ”Energiatehokkuustodistuksessa on esitettävä rakennuksen energiatehokkuus ja vertailuarvoja, kuten energiatehokkuutta koskevat vähimmäisvaatimukset –” direktiivin 11. artikla kuvaa. Lisäksi energiatehokkuustodistuksessa voi kertoa muita lisätietoja kuten vuosittaisen energiankulutuksen ja uusiutuvista energialähteistä tuotetun energian osuuden kokonaisenergiankulutuksesta. Direktiivissä säädetään, että jäsenvaltioiden on varmistettava, että vuoden 2020 loppuun mennessä kaikki uudisrakennukset ovat ns. ”lähes nollaenergiarakennuksia”. Lähes nollaenergiarakennuksella direktiivissä tarkoitetaan ”rakennusta, jolla on erittäin korkea energiatehokkuus. Tarvittava lähes olematon tai erittäin vähäinen energian määrä olisi hyvin laajalti katettava uusiutuvista lähteistä peräisin olevalla energialla, mukaan lukien paikan päällä tai rakennuksen lähellä tuotettava uusiutuvista lähteistä peräisin oleva energia”. (Euroopan Unioni 2010, s. 6, 10)

Suomen Ympäristöministeriö on laatinut asetuksen rakennusten energiatehokkuudesta Euroopan Unionin rakennusten energiatehokkuus -direktiivin mukaisesti. Asetus edellyttää entistä yksityiskohtaisempaa kokonaisenergiatehokkuuden hallintaa uudisrakennuskohteilta. Siinä määrätään rakennuksen kokonaisenergiankulutukselle rakennustyyppikohtainen yläraja, joka ilmaistaan E-luvulla. E-luvun laskenta huomioi mm. rakennuksen käyttämän energian tuotantomuodon. Eri energiamuodoille on annettu omat kertoimet, jotka kuvaavat luonnonvarojen käyttöä, ks. taulukko 1. Nämä kertoimet

ohjaavat käyttämään kaukolämpöä ja -jäähdytystä sekä uusiutuvia energialähteitä. Pieneen E-lukuun on siis mahdollista päästä esim. käyttämällä aurinkosähköenergiaa. (Ympäristöministeriö 2012, s. 8) On syytä huomioda, että E-luvut ovat kansallisia ja toisistaan mahdollisesti poikkeavia. (Euroopan Unioni 2010, s. 29)

Taulukko 1. Energiamuotojen kertoimet E-luvun laskennassa (Ympäristöministeriö 2012, s. 8)

Energiamuoto	kerroin
sähkö	1,7
kaukolämpö	0,7
kaukojäähdytys	0,4
fossiiliset polttoaineet	1,0
rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5

3 Aurinkoenergia uusiutuvana energialähteenä

Uusiutuvia energialähteitä ovat esimerkiksi vesivoima, tuulivoima, aurinkoenergia, jätepolttoaine ja biokaasu. Nämä energialähteet palautuvat nopeasti uudelleen hyödynnettäväksi osittain tai kokonaan. Niiden energian varanto ei vähene pitkällä aikavälillä samalla tavalla kuin fossiilisten polttoaineiden. (Saavalainen 2014a, A7) Tässä luvussa tarkastellaan aurinkoenergiaa energialähteenä.

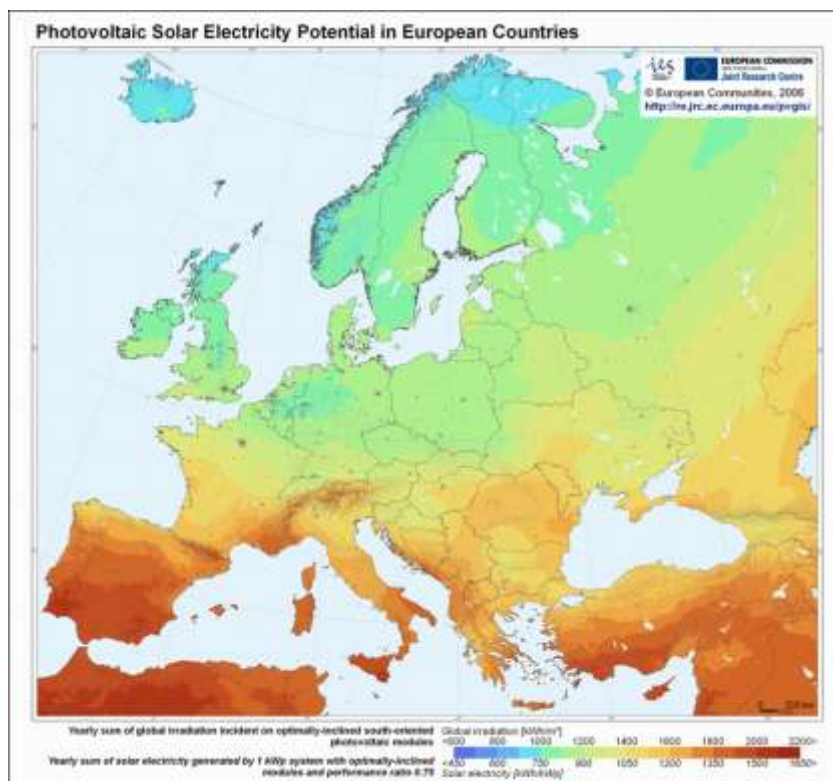
3.1 Aurinko energialähteenä

Auringon keskipisteen lämpötila on korkeampi kuin sen pinnalla. Aurinko on jatkuvassa fuusioreaktiossa, jossa vety muuttuu heliumiksi vapauttaen energiaa säteilynä kaikkiin suuntiin. On arvioitu, että auringon pinnalla vapautuva energia neliömetrille on noin 63 MW. (Kalogirou 2009, s. 49) Auringon säteilyä hyödynnetään sekä sähkön- että lämmöntuotannossa. Sähköntuotannossa auringonvalon fotonit virittävät puolijohteen valenssivyön elektroneja johtavuusvyöhön ja näin syntynyt jännite-ero aikaansaa sähkövirran. Toinen tapa tuottaa sähköä auringon valon avulla on käyttää termisiä aurinkovoimaloita. Termisissä aurinkovoimaloissa auringonvalo keskitetään laajan peilikentän avulla yhteiseen polttopisteeseen ja syntyvällä lämmöllä tuotetaan höyryä höyryturbiiniin. Auringon säteilyn hyödyntäminen lämmöntuotannossa tapahtuu aktiivisesti ja passiivisesti. Passiivinen lämmöntuotanto tapahtuu sitouttamalla

aurionglämpö rakennuksiin niiden sijoituksen, suuntauksen ja rakenteiden avulla. Aktiivinen lämmöntuotanto tapahtuu erityisten lämmönkeräimien avulla, joista lämpö varastoidaan usein lämminvesivaraajiin. (Honkapuro et al. 2009, s. 111)

Aurinkosähkö on yksi tapa tuottaa ympäristöystävällistä sähköä lähellä kulutuspistettä kaupunkiympäristössä. Rakennusmääräysten kiristyminen vaikuttaa lämmitysenergian kulutuksen pienentymiseen, mikä kesällä voi johtaa jäähdytystarpeen lisäämiseen. Jäähdytystarpeen lisääntyminen vaikuttaa tietenkin sähkönkulutukseen. Aurinkosähköjärjestelmä voi tarjota paikallisen ratkaisun syntyneelle sähkön tarpeelle. (Leppänen 2013, s. 22)

Vastoin yleistä käsitystä, Etelä-Suomessa auringon säteily on verrattain voimakasta. Aurinkosähkö on varteenotettava tuotantotapa Etelä-Suomessa. Kuten kuvasta 6 voidaan huomata, auringon säteily on yhtä voimakasta Etelä-Suomessa kuin Keski-Euroopassa.

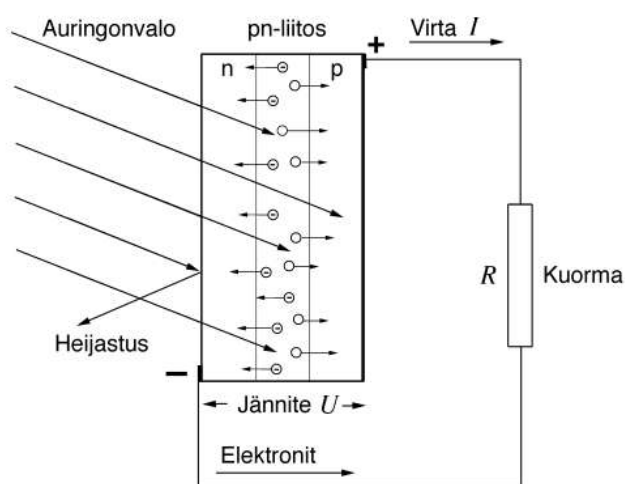


Kuva 6. Aurinkopaneelien aurinkosähkö potentiaali Euroopassa (Joint Research Centre 2006)

3.2 Aurinkosähköpaneelit

Aurinkosähköpaneelien yleistymistä on rajoittanut niiden korkea hinta ja vielä kehitysvaiheessa oleva tekniikka. Suomessa aurinkosähköpaneeleja on yleisesti käytetty kohteissa, jotka eivät ole sähkön jakeluverkon piirissä. Tällaisia kohteita ovat muun muassa kesämökit ja saaristossa sijaitsevat kiinteistöt. Huollon suhteen järjestelmä on helppohoitoinen, koska aurinkosähköpaneelijärjestelmässä ei ole liikkuvia osia. Vuosittain tulee huolehtia, että aurinkosähköpaneelit puhdistetaan epäpuhtauksista, lumesta sekä jäältä.

Aurinkokennon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Aurinkokennoon on yhdistetty kaksi erityyppistä puolijohdemateriaalia (p ja n). Osalla auringonsäteilyn valohiukkasista (fotoneista) on niin suuri energia, että ne pääsevät ohuen pintakerroksen läpi pn-liitokseen ja voivat näin muodostaa elektroni-aukkopareja. Lähellä pn-liitosta muodostuvista pareista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Rajapintaan muodostuu sähkökenttä, jolloin elektronit voivat kulkeutua vain yhteen suuntaan. Elektronit pääsevät yhdistymään p-tyyppin puolijohteeseen kulkeutuneiden aukkojen kanssa ulkoisen johtimen avulla. Ulkoinen johdin toimii väylänä p-tyyppin puolijohteeseen, tuottaen sähkövirran, ks. kuva 7. (Paavola 2013, s. 15–16; Suntekno Oy 2010, s. 1)



Kuva 7. Aurinkosähköpaneelin toimintaperiaate (Suntekno Oy 2010, s. 1)

Aurinkosähköpaneeli koostuu yhteen liitetyistä aurinkokennoista. Aurinkosähköpaneelistä saatavaan ulostulotehoon vaikuttaa oleellisesti auringonsäteilyn teho pinta-alaa kohden. Aurinkosähköpaneelin sähköntuotantomekanismi on verrattain yksinkertainen, jonka johdosta aurinkosähköpaneelilla on korkea käyttövarmuus ja pieni huoltotarve.

Aurinkosähköpaneelien valmistajat ilmoittavat paneelien teknisissä tiedoissa nimellistehon sekä standardi testiolosuhteissa (Standard Test Conditions, STC) että normaalissa aurinkokennon toimintalämpötilassa (Normal Operating Cell Temperature, NOCT). Paneelin nimellisteho aurinkokennon normaalissa toimintalämpötilassa kertoo enemmän paneelin todellisesta toiminnasta. Tulee kuitenkin huomata, että todellinen aurinkosähköpaneelin tuotto vaihtelee riippuen mm. vuoden ajankohdasta, paikasta, ja säästä. (Hellmann 2011, s. 10–11)

Standardi testiolosuhteiksi on määritelty:

- auringon säteily 1000 W/m^2 ,
- aurinkokennon lämpötila 25 °C ja
- ilmamassan arvo 1,5.

Ilmamassan arvo kuvaa auringon säteilyn kulkemaa matkaa ilmakehässä. Auringon paistaessa suoraan yläpuolelta on ilmamassan arvo 1. Ilmamassan arvo 1,5 tulee, kun aurinko paistaa 48° kulmassa zenitistä. (Kalogirou 2009, s. 92)

Normaaliksi aurinkokennon toimintalämpötilaksi on sovittu:

- auringon säteily 800 W/m^2 ,
- aurinkokennon lämpötila $45 \pm 3 \text{ °C}$,
- tuulen nopeus 1 m/s ja
- ilmamassan arvo 1,5. (Hellmann 2011, s. 10)

Aurinkosähköpaneeleita voi vertailla hyötysuhteella. Hyötysuhde kuvaa sitä, kuinka paljon auringon säteilyenergiasta muuttuu sähköenergiaksi. Hyötysuhde saadaan jakamalla nimellisteho paneelin pinta-alan ja säteilytehon 1000 W/m^2 tulolla. Tulos ilmoitetaan prosentteina. Käytetystä tekniikasta riippuen hyötysuhde vaihtelee 8–18 % välillä.

3.3 Aurinkosähköpaneelien asennus ja visuaaliset sovellukset

Aurinkosähköpaneelien yleisin asennustapa kiinteistöihin on kattoasennus, ks. kuva 8. Painovoimaisessa kattoasennuksessa käyttöönotto on nopeaa helpon asennettavuuden takia. Muita asennustapoja aurinkosähköpaneelille ovat muun muassa julkisivuasennus, lasipintojen käyttö ja auringonsuojalipat.

Kattoasennuksessa aurinkosähköpaneelit asennetaan telineisiin haluttuun kulmaan, tai kiinnitetään suoraan kattorakenteisiin, joiden kulma aurinkoa kohden on optimaalinen. Harjakatolle tapahtuva aurinkosähköpaneeliasennus tapahtuu katonmyötäisesti. Tuolloin tarvittava lisäkulma paneeliin saadaan asentamalla paneelien alle vielä telineet tuomaan lisäkulmaa paneeliin. Julkisivuasennuksessa aurinkosähköpaneelit ovat asennettu seinämyötäisesti. Julkisivuasennuksessa on myös mahdollista muuttaa paneelin kulmaa halutun suuruiseksi. Aurinkosähköpaneelien käyttöönotto vaatii tasavirran vaihtovirraksi muuntavan invertterin, sähköjohtovedon sähkökeskukselle, mahdolliset mittaroinnit ja ohjaukset. (Ramboll Oy 2013, s. 38–43)



Kuva 8. Aurinkosähköpaneelit katolla (Nurmijärven Sähkö Oy, verkkokuva)

Aurinkosähköä voidaan hyödyntää rakennuksissa integroimalla aurinkosähköpaneelit rakennuksen seinään, jolloin ne toimivat samalla julkisivuna, ks. kuva 9. Julkisivuasennuksessa aurinkosähköpaneelit ovat näkyvissä ja vaikuttavat tällöin kiinteistöihin arkkitehtonisesti ja kaupunkikuvallisesti. Julkisivuasennuksessa

aurinkosähköpaneelin sähköntuotto ei heikkene lumen ja jään vähäisen muodostumisen johdosta. (Ramboll Oy 2013, s. 41)



Kuva 9. Aurinkosähköpaneeli seinän julkisivussa (Rautaruukki Oyj, Ruukki kuvapankki)

Käytännön visuaalisia sovelluksia on monenlaisia. Aurinkosähköpaneelit voidaan mm. integroida kattolaseihin niin, että ne päästävät päivällä luonnonvaloa lävitse, ks. kuva 10. Auringonsuojalippaan asennettu aurinkosähköpaneeli toimii samalla sekä sähköntuottajana että kiinteistöä varjostavana. Aurinkosuojalipan ikkunoita varjostava vaikutus vähentää kiinteistön jäähdytystarvetta, ks. kuva 11.



Kuva 10. Aurinkosähköpaneelit kattolaseihin integroituna Marrakech lentokentällä Marokossa (Naps Systems Oy 2013a, verkkokuva)



Kuva 11. Aurinkosähköpaneeli aurinkosuojalippana Vaisalan päärakennuksessa (Naps Systems Oy 2013b, verkkokuva)

3.4 Aurinkovoimalat lyhyesti

Aurinkosähköä voidaan tuottaa myös aurinkovoimaloissa (ks. kuva 12), joissa peileillä tai linseillä keskitetään auringonsäteet vesisäiliöihin. Vesisäiliöissä höyrystyvä vesi johdetaan turbiineihin, jotka pyörittävät generaattoreita tuottaen sähköä. Viimeisen kolmen vuoden aikana maailmassa on valmistunut yli 20 yli 100 megawatin aurinkovoimalaa. (Mielonen 2014, B8)



Kuva 12. Ivanpah aurinkovoimala (BrightSource Energy 2014, verkkokuva)

4 Jäähdytys

Luvussa tarkastellaan rakennusten jäähdytysenergian tarvetta. Lisäksi esitellään lyhyesti kaksi erilaista tapaa toteuttaa jäähdytysenergian jakelu.

4.1 Rakennusten jäähdytysenergian tarve

Mitoitettaessa rakennuksen jäähdytystarvetta ovat tärkeimmät mitoituskriteerit huonelämpötilan enimmäisarvo ja tavoitearvon pysyvyys. Lisäksi jäähdytyksen mitoittamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat rakennuksen lämpötekniset ominaisuudet, kuten ikkunoiden pinta-ala, rakenne ja aurinkosuojaus. Huomiota on kiinnitettävä myös rakenteiden lämmönjohtavuuteen, rakennusmassoihin ja niiden varauskykyyn. Jäähdytystehon sopivalla mitoituksella saavutetaan tavoiteltu huonelämpötila. Mitoitukseen vaikuttavat sekä sisäiset että ulkoiset lämpökuormat, joita ovat:

- valaistus,
- koneet sekä atk- ja muut laitteet,
- ihmiset,
- auringon säteily ja
- seinämien läpi johtuva lämpö. (Koskelainen et al. 2006, s. 550)

Rakennusten suurin jäähdytystarve esiintyy yleensä heinä- elokuussa, jolloin ilmanlämpötila ja kosteus ovat korkeimmillaan. Kylmätehon mitoituksessa ja energian kulutusarvoissa voidaan käyttää oheisen taulukon 2 mukaisia arvoja. (Koskelainen et al. 2006, s. 550–551)

Taulukko 2. Jäähdytystehon ja -energian kulutuksen tyypillisiä arvoja erilaisille rakennuksille (Koskelainen et al. 2006, s. 550)

rakennustyyppi	tehontarve W/m ²	energiankulutus kWh/m ²	huipun käyttöaika h
asuinrakennus	15...30	10...15	300...600
toimistorakennus	30...70	15...50	500...1400
kauppakeskus	100...200	70...150	700...2000
atk-tilat	300...		> 3000
hotellit	40...70		800...1200

Jäähdytystehon huipputarve on yleensä lyhytaikaista, keskittyen noin 2–4 tunnin ajaksi iltapäiviin. Tehohuippua voidaan pienentää eri menetelmillä, jolloin jäähdytystehon tuotanto voidaan mitoittaa pienemmälle teholle ja saadaan investoidulle jäähdytysteholle pidempi huipun käyttöaika vuodessa. Jäähdytyksen tehohuippuja voidaan tasata esim. pienentämällä jäähdytysenergian tarvetta kylmäakulla tai antamalla sisälämpötilan liukua. Sisälämpötilan liukumassa annetaan huoneen sisälämpötilan liukua normaalia korkeammaksi ulkoilman lämpötilan ollessa korkea. Tämä toimenpide on mahdollista vain jos huonelämpötilan voidaan sallia nousevan. Lämpöä varastoituu tällöin rakennuksen rakenteisiin. Rakenteet jäähdytetään normaalilämpötilaan yöllä, jolloin muuta lämpökuormaa ei ole. Rakennuksen jäähdytysvesijärjestelmään liitettävä kylmäakku on yleensä tarkoitettu lyhytaikaiseen, noin vuorokauden käyttöön. Kylmäakun koko mitoitetaan niin, että se ehditään ladata edellisen vuorokauden aikana. Yhdessä kylmäkoneen kanssa akun purkausteho on riittävä tuottamaan mitoituspäivän kylmätehon tarve sekä vastaava kylmäenergia. (Koskelainen et al. 2006, s. 551)

4.2 Jäähdytysenergian jakelu keskitetysti ja hajautetusti

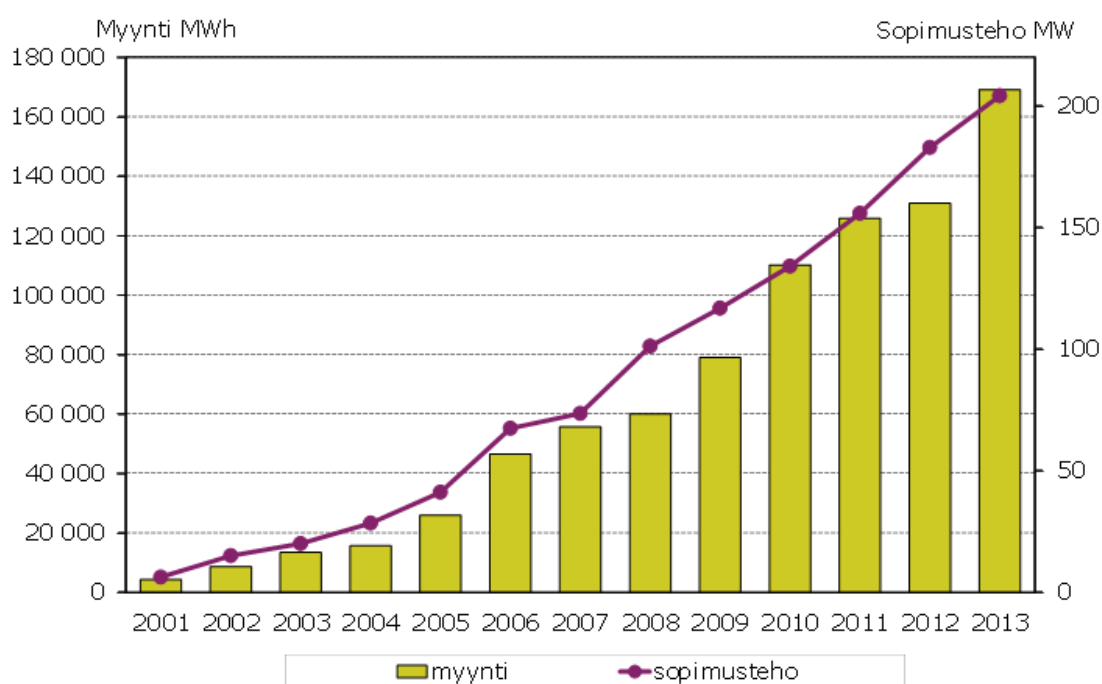
Jäähdytysenergian jakelu voidaan toteuttaa joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä jäähdytysjärjestelmässä käytetään eri tilanteissa kulloinkin soveltuvinta kylmän lähdetä ja tarkoitukseen soveltuvaa tekniikkaa. Siinä jäähdytysenergia tuotetaan suurissa yksiköissä, joko

- absorptiokoneilla, jossa energialähteenä käytetään kaukolämpöä tai teollisuudessa muodostunutta hukkalämpöä;
- kompressorikoneilla, jossa kaukojäähdytys tuotetaan sähkötoimisilla kompressoreilla;
- lämpöpumpuilla, jossa toimintaperiaate on sama kuin kompressorissa, mutta lisäksi kylmäntuotannossa syntyvä lauhdutuslämpö voidaan ottaa talteen tai
- vapaalla jäähdytyksellä, jossa jäähdytysenergian tuotannossa voidaan hyödyntää meri, järvi- tai jokivettä sekä ulkoilmaa. (Koskelainen et al. 2006, s. 529–539)

Hajautetulla jäähdytyksellä tarkoitetaan tuotantomallia, jossa verrattain pienet energiantuotantolaitokset tai –koneet on sijoitettu lähelle kulutuspistettä. Esimerkiksi

oma aurinkosähköpaneelijärjestelmä tai pieni tuulivoimala voivat olla keinoja tuottaa energiaa, jota hyödynnetään jäähdytykseen.

Kiinnostus kaukojäähdytystä kohtaan on kasvussa Suomessa. Kuvasta 13 voidaan havaita, että vuosina 2001–2013 kaukojäähdytysenergian myynti ja sopimusteho ovat olleet voimakkaassa kasvutrendissä, heti kaukojäähdytystoiminnan myynnin aloittamisesta lähtien. Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan keskitetyssä tuotantolaitoksessa tuotetun jäähdytetyn veden jakelua erillisen jakeluverkoston välityksellä rakennuksille. Suomessa vesistöjen kylmä vesi riittää hyödyntämään sellaisenaan kaukojäähdytyksen tarpeet 4–8 kuukaudeksi vuodessa. (Koskelainen et al. 2006, s. 531) Kaukojäähdytyksen kysynnän vuoksi on kiinnostavaa tarkastella myös paikallisia tapoja tuottaa jäähdytysenergiaa kaupunkiympäristössä.



Kuva 13. Kaukojäähdytysenergian myynti ja sopimusteho vuosina 2001 – 2013 (Energiateollisuus 2013a, s. 2)

Vuonna 2013 Helsingin Energialla oli 252 kaukojäähdytysasiakasta, joiden yhteenlaskettu sopimusteho oli 151 MW. Näin ollen voidaan argumentoida kuvaan 13 peilaten, että Helsingin Energia on Suomen merkittävin yksittäinen kaukojäähdytyksen myyjä. (Energiateollisuus 2013b, Kaukojäähdytys v. 2013)

5 Tutkimusaineisto, tutkimusmenetelmät, Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli

Tässä luvussa käsitellään tutkimusaineistoa ja tutkimusmenetelmiä. Tutkimuksen teoreettisena viitekehyksenä toimii Hannu-Pekka Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli (Photovoltaic power generation modeling). Mallin avulla Hellman esitti aurinkosähköpaneelin tuottaman sähkötehon tunneittain. (Hellman 2011) Tässä tutkielmassa tarkasteltiin teoreettisesti kuinka aurinkosähköpaneeleita voitiin hyödyntää valittujen kulutuspisteryhmien jäähdytykseen tarvittavan sähköenergian tuottamiseen.

Tutkielmassa valittiin Helsingin kantakaupungista kulutuspisteryhmää, joiden kaukojäähdytysenergian mitattuja kulutustietoja käytettiin neljän kuukauden ajanjaksolla; touko-, kesä-, heinä ja elokuussa vuonna 2011. Jäähdytysenergian kulutustietoja hyödynnettiin laskettaessa tarvittavien aurinkosähköpaneelien sähkötehoa suhteutettuna jäähdytysenergian huipputehotuntiin. Näin saatiin selville aurinkosähköpaneelikenttien tarvittavat pinta-alat ja voitiin tarkastella onko kulutuspisteryhmien jäähdytystä (sähkötehon tarve) mahdollista toteuttaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla.

Varsinaisia tutkimuskysymyksiä olivat:

- Onko kulutuspisteryhmien jäähdytyksen huipputehotunnin tarvitsema sähköteho mahdollista toteuttaa rakennusten katoille sijoitettavien aurinkosähköpaneelien avulla?
- Voidaanko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa riittävästi jäähdytykseen auringonpaistetunteina?
- Mahtuuko kiinteistön jäähdytystarpeen täyttävä aurinkosähköpaneelikenttä kiinteistön katolle, mikä sen pinta-ala on kulutuspisteissä?

5.1 Hellmanin malli aurinkosähkötuotannosta

Hellman esitteli tutkimuksessaan aurinkosähkötuotantomallin, jonka avulla voitiin tarkastella aurinkosähköpaneelin tuottamaa tuntiperusteista sähkötehoa todellisissa

sääoloissa Etelä-Suomessa. Hellmanin malli huomioi ilmastollisten olosuhteiden vaikutukset: ilmakehän puhtauden, pilvisyyden ja ilman lämpötilan. Hellman perusti aurinkosähkötuotantomallinsa Rigollier et al.:n tavalle laskea auringon teoreettinen kokonaissäteily (G) pilvettömällä säällä. Tätä menetelmää Hellman hyödynsi tutkimuksessaan olevassa regressiomallissa, joka antaa arvion tuntiperusteisesta auringon säteilyenergiasta. (Hellman 2011, s. 2, 8)

Lisäksi Hellman hyödynsi omassa mallissaan Mattei et al.:n tarkastelua yksinkertaisen aurinkosähköpaneelin tuotantomallista, jossa huomioitiin mm. ulkolämpötila ja auringon kokonaissäteilyn vaikutus aurinkokennon lämpötilaan (Hellman 2011, s. 11). Hellman käytti tutkimuksessaan Rigollier et al.:n tapaa laskea auringon teoreettinen kokonaissäteily (G) ja Ilmatieteen laitokselta saatua mittausdataa auringon säteilyenergiasta. Mittausdata perustui eri aurinkosähköpaneelin kallistuskulmille ja aurinkopaistetuille. (Hellmann 2011, s. 13–14) Hellman huomauttaa, että Rigollier et al.:n perustuva auringon teoreettinen kokonaissäteily (G) antaa välittömän arvon auringon säteilymäärästä, kun taas Ilmatieteen laitoksen mitattu auringon säteilyenergia antaa tunnin arvon auringon säteilyenergiasta. Kyseiset arvot eivät siis ole täysin verrattavissa toisiinsa. Hellman on kuitenkin päättänyt käyttämään arvoja rinnasteisina, vaikka tapa ei ole tarkin mahdollinen. (Hellmann 2011, s. 13)

Hellman muodosti matriiseja auringon kokonaissäteilylle. Matriisien perusteena oli aurinkosähköpaneelin kallistuskulma ja eri auringonpaistetuntien esiintyvyys (Hellmann 2011, s. 17). Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli perustuu edellä mainituille matriiseille. Näitä matriiseja hyödyntämällä voidaan tarkastella minkä tahansa aurinkosähköpaneelin tuottamaa tunnittaista sähkötehoa.

5.1.1 Auringon teoreettinen kokonaissäteily

Tässä kappaleessa esitellään tarkemmin Rigollier et al.:n mallia. Hellmanin mukaan Rigollier et al. määrittävät auringon teoreettisen kokonaissäteilyn (G) suoran auringonsäteilyn ja auringon hajasäteilyn avulla. Hellman huomauttaa, että usein teoreettisissa malleissa käytetään lisäksi auringon heijastussäteilyä, mutta hän on rajannut sen pois omassa tutkimuksessaan. (Hellmann 2011, s. 10)

Auringon teoreettisen kokonaissäteilyn (G) määrittämiseen tarvitaan tieto auringonsäteilyn määrästä maapallon ilmakehän ulkopuolella, auringon paikka havaitsijaan nähden, aurinkosähköpaneelin kallistuskulma ja Linke sameus –kerroin. Auringonsäteilyn määrä aurinkoa vastaan kohtisuoralla pinnalla maapallon ilmakehän ulkopuolella voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä (1), kun tiedetään havainto päivämäärää vastaava päivän lukema. (Kalogirou 2009, s. 88–89).

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right] \quad (1)$$

jossa G_{on} on auringonsäteilyn määrä ilmakehän ulkopuolella vuoden N :tenä päivänä

G_{sc} on aurinkovakio (1367 W/m^2)

N on havainto päivämäärää vastaava lukema. Esimerkiksi 4.tammikuuta päivä vastaa arvoa neljä ($N = 4$).

Auringon paikan määrittämiseen tarvitaan tietää aurinkoaika (Solar time). Aurinkoajan keskipäivä on, kun aurinko on tarkastelijaan nähden korkeimmalla kohdalla. Yhtälöissä aurinkoaika muutetaan tuntikulmaksi (ω), jossa asteluku 15 vastaa yhtä tuntia. Tuntikulmat ovat negatiiviset ennen keskipäivää ja positiiviset keskipäivän jälkeen. Aurinkoajan ja paikallisen ajan (Standard time) ero voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä (2)

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2)$$

jossa L_{st} on paikallisen aikavyöhykkeen pituuspiiri

L_{loc} on havaitsijan pituusaste

E on aurinkoajan korjaustermi.

Aurinkoajan korjaustermi (E) (Duffie et al. 2006, s. 11–12) on

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (3)$$

jossa B on,

$$B = (N - 1) \frac{360}{365} \quad (4)$$

Auringon kulmaetäisyys eli deklinaatiokulma δ keskipäivällä (aurinkoaikaa) ekvaattoritasoon nähden (Duffie et al. 2006, s.13),

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(360 \frac{284+N}{365} \right) \quad (5)$$

jossa δ on auringon kulmaetäisyys, jossa pohjoinen on positiivinen.

Auringon korkeuskulma α_s , eli horisontaalitasoon ja auringonsäteilyn välinen kulma, horisontista voidaan nyt laskea yhtälöstä (6) (Duffie et al. 2006, s.16),

$$\alpha_s = \arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (6)$$

jossa α_s on auringon korkeuskulma

ϕ on havaitsijan leveysaste, joka on pohjoisella pallonpuoliskolla positiivinen ja eteläisellä pallonpuoliskolla negatiivinen.

Auringon atsimuutti γ_s , eli suunnan horisontaalinen komponentti etelästä, lasketaan yhtälöstä (7) (Duffie et al. 2006, s.15–16),

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \arccos \left(\frac{\sin \alpha_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \phi} \right) \right| \quad (7)$$

jossa γ_s on auringon atsimuutti, joka on positiivinen länteen.

Säteilyn tulokulma θ_i , joka on suoran säteilyn ja säteilyä vastaanottavan tason normaalin välinen kulma, voidaan laskea yhtälöllä (8) (Duffie et al. 2006, s.15–16) käyttämällä edellisiä yhtälöitä

$$\theta_i = \arccos [\sin \alpha_s \cos \beta + \cos \alpha_s \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)] \quad (8)$$

jossa θ_i on säteilyn tulokulma
 β on aurinkosähköpaneelin kallistuskulma
 γ on aurinkosähköpaneelin atsimuutti etelästä.

Rigollier et al.:n kirkkaan sään mallia auringon teoreettiselle kokonaissäteilylle käytetään tässä tutkimuksessa. Malli erottelee toisistaan suoran auringonsäteilyn ja auringon hajasäteilyn. Suoran auringonsäteilyn komponentti G_b kaltevalle tasolle lasketaan seuraavalla yhtälöllä (9). (Rigollier et al. 2000, s.34)

$$G_b = G_{on} \cos \theta_i \exp (-0,8662T_L m \delta_R) \quad (9)$$

jossa T_L on Linke sameus -kerroin ilmamassan arvolle 2 Helsinki-Vantaan lentokentällä
 m on suhteellinen optinen ilmamassa
 δ_R on Rayleigh optinen tiheys.

Linke sameus -kerroin kuvaa saasteiden, pölyn ja vesihöyryn aiheuttamaa sirontaa, joka alentaa auringosta tulevaa säteilytehoa. Jos ilmakehä olisi puhdas partikkeleista, olisi Linke sameus -kerroin lähellä arvoa yksi. Hellman on käyttänyt tutkimuksessaan Linke sameus -kertoimelle arvoja, jotka ovat olleet saatavilla The SoDa -palvelusta, jota pitää yllä Armines / MINES ParisTech, Centre Energ'etique et Proc'ed'es (CEP). Arvot on nähtävissä taulukossa 3. Kuukauden Linke sameus -kertoimet on interpoloitu, jotta saadaan päivittäinen jatkuva arvo, eikä arvo muutu dramaattisesti kuukausien välissä. (Hellmann 2011, s. 12)

Taulukko 3. Linke sameus -kerroin ilmamassan arvolle 2 Helsinki-Vantaan lentokentällä (Hellmann 2011, s. 13)

kuukausi	T_L
tammikuu	3
helmikuu	2
maaliskuu	2,35
huhtikuu	2,7
toukokuu	2,7
kesäkuu	2,9
heinäkuu	3
elokuu	3,3
syyskuu	3,3
lokakuu	2,9
marraskuu	2,8
joulukuu	2

Suhteellinen optinen ilmamassa m lasketaan yhtälöstä (10)

$$m = \frac{p/p_0}{\sin \alpha_s^{true} + 0,50572(\alpha_s^{true} + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (10)$$

Muuttujat yhtälöön (10) lasketaan seuraavasti:

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(\frac{-z}{z_h}\right) \quad (11)$$

jossa z on havaitsijan korkeus metreinä merenpinnan yläpuolella

z_h on 8435,5 metriä.

Todellinen auringon korkeuskulma α_s^{true} on

$$\alpha_s^{true} = \alpha_s + \Delta\alpha_{ref} \quad (12)$$

jossa

$$\Delta\alpha_{ref} = 0,061359 \left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \frac{0,1594 + 1,123 \left(\frac{\pi}{180}\right) \alpha_s + 0,065656 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \alpha_s^2}{1 + 28,9344 \left(\frac{\pi}{180}\right) \alpha_s + 277,3971 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \alpha_s^2} \quad (13)$$

Kun $m \leq 20$, niin Rayleigh:n optinen tiheys tulee yhtälöstä (14)

$$\delta_R = \frac{1}{6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4} \quad (14)$$

ja muuten yhtälöstä (15)

$$\delta_R = \frac{1}{10,4 + 0,718m} \quad (15)$$

Auringon hajasäteily G_d lasketaan seuraavasta yhtälöstä (16)

$$G_d = G_{on} T_{rd} F_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (16)$$

jossa hajasäteilyn siirtofunktio zenitistä T_{rd} on

$$T_{rd} = -0,015843 + 0,030543T_L + 0,0003797T_L^2 \quad (17)$$

ja hajasäteilyn kulmafunktio F_d on

$$F_d = A_0 + A_1 \sin \alpha_s + A_2 \sin^2 \alpha_s \quad (18)$$

Kertoimet A_0 , A_1 ja A_2 ovat

$$A_0 = 0,26463 - 0,061581T_L + 0,0031408T_L^2 \quad (19)$$

$$A_1 = 2,0402 + 0,018945T_L - 0,011161T_L^2 \quad (20)$$

$$A_2 = 1,3025 + 0,039231T_L + 0,0085079T_L^2 \quad (21)$$

jos tekijät A_0 ja T_{rd} ovat vähemmän kuin 0,002, silloin

$$A_0 = \frac{0,002}{T_{rd}} \quad (22)$$

Edellä esitetyistä yhtälöistä (Rigollier et al. 2000, s. 34–44) saadaan arvio kirkkaan taivaan auringon teoreettiselle kokonaissäteilylle, kun yhdistetään sekä suora auringonsäteily että auringon hajasäteily yhtälöön (23).

$$G_{\text{glob}} = G_b + G_d \quad (23)$$

jossa G_{glob} on teoreettinen auringon kokonaissäteily.

5.1.2 Aurinkosähköpaneelin tuotantomalli

Tässä aluvuossa esitellään kuinka Hellman hyödynsi omassa mallissaan Mattei et al.:n tarkastelua yksinkertaisen monikiteisen aurinkosähköpaneelin tuotantomallista (Hellman 2011, s. 11). Tutkimuksessaan Hellman oletti, että aurinkosähköpaneeli on kytketty invertteriin. Invertteri, eli vaihtosuuntaaja, muuttaa aurinkopaneeleista saatavan tasavirran vaihtovirraksi. Hellman käytti invertterin hyötysuhteena η_{inv} arvoa 0,95. (Hellmann 2011, s. 10).

Hellman hyödynsi tutkimuksessa seuraavia parametriarvoja piikennoille. Normaaliksi kennon toimintalämpötilaksi T_{NOCT} oli valittu 47 °C ja tehon lämpötilakertoimena β_P oli 0,45 %/°C. (Hellman 2011, s.11) Aurinkosähköpaneelin kennon lämpötila T_C on lineaarinen johtuen auringon säteilystä, jolloin yhtälö on muotoa (24) (Mattei et al. 2006, s. 557)

$$T_C = T_a + (T_{\text{NOCT}} - 20^\circ\text{C}) \frac{G}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (24)$$

jossa T_C	aurinkosähköpaneelin kennon lämpötila
T_{NOCT}	aurinkosähköpaneelin normaali kennon lämpötila, 47 °C
T_a	on ympäristön lämpötila
G	on auringon kokonaissäteily.

Aurinkosähköpaneelin teho tulee seuraavasta yhtälöstä (25) (Mattei et al. 2006, s. 555)

$$P = \frac{G_b + G_d}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \eta_{\text{inv}} P_{\text{max}} [1 - \beta_P (T_C - T_{\text{STC}})] \quad (25)$$

jossa P_{max}	on aurinkosähköpaneelin nimellisteho
------------------------	--------------------------------------

η_{inv}	invertterin hyötysuhde
β_P	on tehon lämpötilakerroin
T_{STC}	on ulkoilmalämpötila 25 °C STC:ssä.

5.1.3 Hellmanin aurinkosähkötuotantomallin ytimessä havaintodata ja regressiomalli

Hellman käytti Ilmatieteen laitokselta saatua mittausdataa säätilasta sekä auringon säteilystä ajanjaksolta 1.1.1981–10.7.2011 Helsinki-Vantaan lentokentältä (60°19' N, 24°57' E, 53 metriä meren pinnan yläpuolella). Mittausdata sisälsi tuntiperusteista tietoa auringon kokonaissäteilyenergiasta ja hajasäteilyenergiasta, auringonpaistetunneista sekä ympäristön lämpötilasta. Ilmatieteen laitokselta saatuihin puuttuviin mittausarvoihin Hellman teki muutoksia joko korjaamalla arvon edellisen tunnin mittausarvolla tai muodostamalla puuttuvaan arvon edellisen ja seuraavan tunnin keskiarvosta. (Hellman 2011, s. 17)

Auringon kokonaissäteilyn määrittämiseen vuoden aikana Hellman käytti auringonpaistetuntien todennäköisyyksiä eri kuukausina. Auringonpaistetunti (t_{ssh}) kuvaa sellaista tuntia vuorokaudessa, jolloin aurinko paistaa. Taulukossa 4 todennäköisyys $t_{ssh}=0$ tarkoittaa, että aurinko ei paista ollenkaan ja $t_{ssh}=1$, että aurinko paistaa. Hellman jätti muut arvot tarkastelunsa ulkopuolelle. Keskiarvo t_{ssh} on auringonpaistetuntien kuukausittainen painotettu keskiarvo. (Hellman 2011, s. 15)

Taulukko 4. Auringonpaistetuntien todennäköisyydet ja keskiarvot kuukausittain (Hellman 2011, s. 17)

kuukausi	$t_{ssh} = 0$ %	$t_{ssh} = 1$ %	keskiarvo t_{ssh}
tammikuu	70,3	7,9	0,179
helmikuu	54,9	15,7	0,297
maaliskuu	46,7	20,4	0,366
huhtikuu	34,3	23,9	0,452
toukokuu	24,7	27,2	0,518
kesäkuu	26,3	22,4	0,490
heinäkuu	21,7	23,0	0,526
elokuu	25,2	16,4	0,456
syyskuu	35,8	13,4	0,375
lokakuu	53,1	11,2	0,273
marraskuu	71,5	6,9	0,165
joulukuu	75,2	5,6	0,142

Hellman käytti tutkimuksessaan vuoden aurinkopaistetuntien keskiarvoa 0,437, jolla hän sai vuoden auringon säteilyenergian kokonaismäärän horisontaaliselle tasolle vain 3,6 prosenttia korkeammaksi kuin oli Ilmatieteen laitoksen mitattuun dataan perustuva auringon säteilyenergian tulos. Ilmatieteen laitokselta saadut ympäristön lämpötila-arvot oli mitattu vain joka kolmas tunti vuoteen 2001 saakka. Hellman muodosti kuitenkin mitatuista lämpötiloista 30 vuoden aikasarjan tuntiperusteisesti. Aikasarjasta tuli näin yhteneväinen muiden Ilmatieteen datasta mitattujen arvojen kanssa. (Hellman 2011, s. 16–17)

Lasketusta auringon teoreettisesta kokonaissäteilystä, Ilmatieteenlaitokselta saaduista mitatuista auringon kokonais- ja hajasäteilyenergiasta sekä auringonpaistetunneista Hellman hyödynsi Matlab-ohjelmistolla seuraavaa yhtälöä (26) regressiomalliksi tuntiperustaisen auringon säteilyenergian muodostamiseen,

$$H_{\text{fit}} = \beta_0 + \beta_1 G_{\text{glob}} + \beta_2 t_{\text{ssh}} + \beta_3 G_{\text{glob}} t_{\text{ssh}} + \beta_4 G_{\text{glob}}^2 + \beta_5 t_{\text{ssh}}^2 \quad (26)$$

jossa β_n , on regression kertoimia $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$

t_{ssh} on auringonpaistetuntien arvo väliltä 0 - 1.

Regressiokertoimet olivat Ilmatieteen laitoksen mittaustietoa auringon säteilyenergiasta horisontaalille tasolle 1.1.2000–31.12.2009 ja kalteville tasoille (42° ja 90°) 1.1.2000–31.12.2007. Regressiokertoimet kaltevalle tasolle (42°) ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Regressiokertoimet, auringon säteilyenergia kaltevalle tasolle (42°) (Hellman 2011, s. 15)

n	0	1	2	3	4	5
β_n	-0,584	0,188	69,53	0,768	-0,000007	-57,482

Edellä esitellyn regressiomallin avulla Hellman muodosti tuntiperusteiset auringon kokonaissäteilyn indeksit p_{index} , jotka hän esitti 12 x 24 matriiseina (Hellmann 2011, s. 13–14). Hellmanin aurinkosähkötuotantomalli perustuu edellä mainituille matriiseille. Näitä matriiseja hyödyntämällä voidaan tarkastella minkä tahansa aurinkosähköpaneelin tuottamaa tunnittaista sähkötehoa.

Hellmanin aurinkosähkötuotantomallin ytimenä on seuraava kaava (27), jolla voidaan laskea keskimääräinen aurinkosähköpaneelin tuottama tuntiperusteinen teho vuoden jokaiselle päivälle. (Hellman 2011, s. 18)

$$P_{m,h} = \frac{\eta_{inv} \cdot P_{max} \cdot p_{index}}{1000} \quad (27)$$

jossa $P_{m,h}$ on keskimääräinen tuntiperusteinen aurinkosähköpaneelin teho

η_{inv} on invertterin hyötysuhde

P_{max} on aurinkosähköpaneelin nimellisteho STC

p_{index} on auringon tuntiperusteinen kokonaissäteilyn indeksi.

5.2 Kulutuspisteryhmissä mitattu jäähdytysenergia ja sähkön kokonaiskulutus

Helsingin Energialla on tietovarastojärjestelmä, josta on saatavissa reaaliaikaiset jäähdytysenergian kulutustiedot eri kulutuspisteiden osalta tunneittain. Järjestelmä saa energian tuotantolaitoksilta olevista mittalaitteista mittausjärjestelmien kautta hetkellisiä ja tuntimittausarvoja, jotka tallentuvat tietovarastojärjestelmään. Yksittäisten kulutuspisteiden kerros- ja kattopinta-alojen neliömäärät ovat saatavilla Helsingin Energian (Helen) Lämmitysmarkkinat -liiketoiminnon WebMap -verkkokarttasovelluksesta.

Tässä tutkimuksessa tarkasteluajanjaksona on touko-elokuu vuonna 2011. Helsingin energian mittausdataa on hyödynnetty jäähdytysenergian kulutuksen osalta tunneittain kaikissa kulutuspisteryhmissä. Tutkimuksessa kulutuspisteet ryhmiteltiin kolmeen ryhmään: toimistorakennukset, kauppakeskukset ja asuinkiinteistöt. Nämä kulutuspisteryhmät rajattiin tutkimuksenkohteeksi, koska jäähdytysenergian mittaustietoa ei ole saatavilla muiden kiinteistötyyppien osalta.

Tiedot kulutuspisteiden kuluttamasta sähkötehosta tunneittain on koottu etäluettavilta mittareilta. Mittausdata kulutetusta sähkötehosta on touko-, kesä-, heinä- ja elokuulta vuodelta 2011. Kulutuspisteryhmien mitatusta sähkötehosta muodostettiin jokaiselle

tarkastelukuukaudelle 24 tunnin aikasarjat, samalla tavalla kuin meneteltiin jäähdytysenergiaa tarkasteltaessa. Mittausdata ei huomioi sähkötehon mittaustulokseen mahdollisesti vaikuttaneita erityistilanteita, kuten remonttia tms.

Tutkimuksen kohteeksi valittiin kuusi toimistorakennusta, joiden neliömäärät vaihtelivat 10 000 – 35 000 neliömetrin välillä. Kaikkien kuuden toimistorakennuksen yhteenlaskettu neliömäärä oli noin 117 000 neliömetriä. Kauppakeskuksia tarkasteluun otettiin kolme kappaletta ja niiden neliömäärät vaihtelivat 20 000 – 110 000 neliömetrin välillä. Kauppakeskusten yhteenlaskettu neliömäärä oli noin 180 000 neliömetriä. Asuinkiinteistöjä valittiin kaksi kappaletta ja niiden neliömäärät olivat noin 10 000 neliömetriä. Kokonaisneliömäärä oli noin 21 000 neliömetriä.

Tutkimus toteutettiin kulutuspisteryhmittäin. Kustakin rakennustyyppiryhmästä laskettiin yhteen ryhmään kuuluvien kulutuspisteiden jäähdytysenergian kulutus tunneittain tarkastelujaksolla ja jaettiin se kulutuspisteiden lukumäärällä. Näin saatiin jokaiselle ryhmälle keskiarvo jäähdytysenergian kulutuksesta tarkasteltaville kuukausille. Keskiarvo-menetelmän katsottiin antavan riittävä tarkkuus, koska kulutuspisteiden neliömäärät vaihtelivat toisistaan eikä rakennusten käyttötarkoituksesta ollut tarkkaa tietoa.

Hellmanin aurinkosähkötuotantomallia sovellettiin tutkimuksessa niin, että jokaiselle ryhmälle muodostettiin yksi 24 tunnin aikasarjamatriisi tarkastelukuukausittain kuvaamaan ryhmän jäähdytysenergian kulutusta (liite C). Kyseisistä matriiseista etsittiin jäähdytysenergian kulutuksen huipputunti tarkastelukuukausittain sekä kulutuspisteryhmittäin.

5.3 Aurinkosähköpaneelit tarkastelluissa kulutuspisteryhmissä

Tässä tutkielmassa lähdettiin siitä, että aurinkosähköjärjestelmän sijoituspaikkana kulutuspisteissä toimii kulutuspisteen rakennuksen katto. Tutkimuksessa oletettiin tarkasteltavien kulutuspisteiden kattojen olevan tasakattoja, jotka olisivat kokonaisuudessaan käytettävissä aurinkosähköpaneeleille, ilman rakenteellisia rajoitteita.

Helsingin kaupunginvaltuusto on hyväksynyt 22.9.2010 Helsingin kaupungin rakennusjärjestyksen, jossa vapautetaan aurinkokeräimet tonttien toimenpideluvista. Rakennusjärjestyksen 21 §:n kohta 4 vapauttaa toimenpideluvan hakemisesta: ”aurinkokeräimen sijoittaminen rakennukseen, rakennelmaan tai pihamaalle” ilman toimenpidelupaa on mahdollista kuitenkin niin, että ”rakentamisessa on noudatettava voimassa olevan asemakaavan määräyksiä ja kyseiseen rakentamiseen liittyviä säännöksiä, suojelluissa rakennuksissa tulee ottaa huomioon rakennussuojelusta aiheutuvat vaatimukset.” (Rakennusvalvontavirasto 2010). Aurinkokeräimellä viitataan auringon lämpösäteilyn hyväksyntään, mutta koska aurinkokeräimet ovat pinta-alaltaan ja rakenteeltaan melko yhtenevät tutkimuksessa esimerkkinä käytetyn aurinkosähköpaneelin kanssa, voidaan olettaa että rakennusjärjestyksen pykälä 21 soveltuu myös aurinkosähköpaneeleille.

Aurinkosähköpaneelien asennuksessa tasakatoille on huomioitava muutamia tärkeitä asioita.

- Katon reunasta on jätettävä yhden metrin levyinen suoja-alue, jolle ei saa asentaa aurinkosähköpaneeleita. Suoja-alue johtuu tasakattojen reuna-alueiden imu ja painehuipuista, jotka voivat vahingoittaa aurinkosähköpaneeleita. (IVT Lämpöpumput Oy 2009, s. 15)
- Aurinkosähköpaneelienten tarvitsemaan pinta-alalaskentaan tulee ottaa huomioon huoltoalue aurinkosähköpaneelirivien välissä sekä aurinkosähköpaneelirivien aiheuttama varjostus seuraavalle aurinkosähköpaneeliriville.
- Aurinkosähköpaneelit edellyttävät tasakatoilla tukirakenteita. Paneelisiin kohdistuva tuulikuorma vaatii tukevia ja painavia rakennelmia. Näiden rakennelmien rakentaminen voi edellyttää kattorakenteiden vahvistamista, joka nostaa aurinkosähköpaneelijärjestelmän kokonaishintaa. (Helsingin kaupungin energiansäästöneuvottelukunta 2013)
- Tasakattoasennuksessa tulee huomioida lumen pudotusmahdollisuus katolta (NIBE AB 2011, s. 9).

Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään aurinkosähköpaneelina Hanwha yrityksen ”Q.Pro BLK-G3 250 Wp” -paneelia. Paneelin aurinkokennot ovat monikiteistä piitä. Sen ilmoitettu hyötysuhde on standardi testiolosuhteissa (STC) 15 % ja normaaliolosuhteissa (NOCT) 11 %. Paneelin ulkoiset mitat ovat (pituus x leveys x paksuus) 1670 mm x 1000 mm x 35 mm. Kyseisen aurinkosähköpaneelin tekniset tiedot löytyvät liitteestä D. (Hanwha 2013) Tässä tutkielmassa laskenta perustuu standarditestiolosuhteisiin, jolloin aurinkosähköpaneelin hyötysuhde on 15 %.

5.3.1 Aurinkosähköpaneelientän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla

Tutkimuksessa tarkasteltiin aurinkosähköpaneelientän pinta-alan soveltumista kulutuspisteryhmien katoille. Teoreettinen aurinkosähköpaneelientän pinta-ala laskettiin jokaiselle tarkasteluukaudelle jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan.

Tutkimusasetelmassa aurinkosähköpaneelit oletettiin asennettavan pystyyn niin, että aurinkosähköpaneelin lyhin sivu olisi lähinnä kattoa. Tutkielman tarkastelu rajattiin vain yhteen aurinkosähköpaneelin kallistuskulmaan, 42 asteeseen, kahdella auringonpaistetuntien arvolla, eli Hellmanin mallin mukaan vuoden auringonpaistetuntien keskiarvolla 0,437 sekä auringonpaistetunnin arvolla 1.

Liitteessä A löytyy Hellmanin muodostamat auringon tuntiperusteisen kokonaissäteilyn indeksit esitettynä matriisissa (12 x 24) tunneittain vuorokauden jokaiselle tunnille vuoden jokaisen kuukauden osalta. Matriisissa aurinkosähköpaneelin kallistuskulmana oli 42° ja aurinkopaistetuntien arvona oli 0,437. Liitteestä B löytyy vastaava matriisi aurinkosähköpaneelin kallistuskulmalla 42° ja aurinkopaistetunnin arvolla 1.

Tutkimuksessa määritettiin jäähdytyksen huipputehotunti sekä huipputehotuntiin tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala. Aurinkosähkön hyödyntämistä on tarkasteltu kahdesta näkökulmasta. Ensin on laskettu aurinkosähköpaneelin pinta-ala, jolla tarkoitetaan aurinkosähköpaneelin pinta-alaa pelkästään, ilman turvaetäisyyksien tai varjostuksen tarvitsemää tilatarvetta. Sen jälkeen on laskettu aurinkosähköpaneelientän pinta-ala, jossa on huomioitu pinta-ala hukka, joka muodostuu peräkkäisistä aurinkosähköpaneeliriveistä, turvaetäisyyksistä ja paneelirivien varjostusten

huomioimisesta. Aurinkosähköpaneelikentässä rivistöjen väliin jätetään tarvittava alue huollolle ja turvaetäisyyksille sekä aurinkosähköpaneelirivien aiheuttaman varjostuksen poistamiseksi. Tutkimuksessa tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala muutettiin vielä tarvittavaksi aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaksi.

Tässä tutkimuksessa käytettiin sähkötehon ja jäähdytystehon suhdelukuna 1/4,6. Eli yhden kilowatin sähköteholla voitiin tuottaa jäähdytystehoa 4,6 kilowattia. (Fläkt Woods Oy 2010, s. 8).

Jäähdytyksen teho tuntiaikasarjana on esitetty liitteessä C kulutuspisteryhmiin jaoteltuna. Tutkielmassa tuntiaikasarjasta etsittiin jäähdytyksen huipputehotunti kulutuspisteryhmittäin sekä tarkastelu kuukausittain. Hellmanin muodostaman aurinkosähkötuotantomallin avulla kaava (27) laskettiin aurinkosähköpaneelin tuottama sähköteho $P_{m,h}$ jäähdytyksen huipputehotunnilla.

Kun jäähdytyksen huipputehotunti $P_{j\text{äähdytys}}$ jaettiin aiemmin mainitulla suhdeluvulla 4,6 saatiin selville tarvittava sähköteho P_j , jolla voitiin tuottaa jäähdytyksen huipputeho kyseiselle tunnille (28)

$$P_j = \frac{P_{j\text{äähdytys}}}{4,6} \quad (28)$$

jossa $P_{j\text{äähdytys}}$ on jäähdytyksen huipputehotunnin arvo
 P_j on jäähdytyksen huipputehotunnille tarvittava sähköteho.

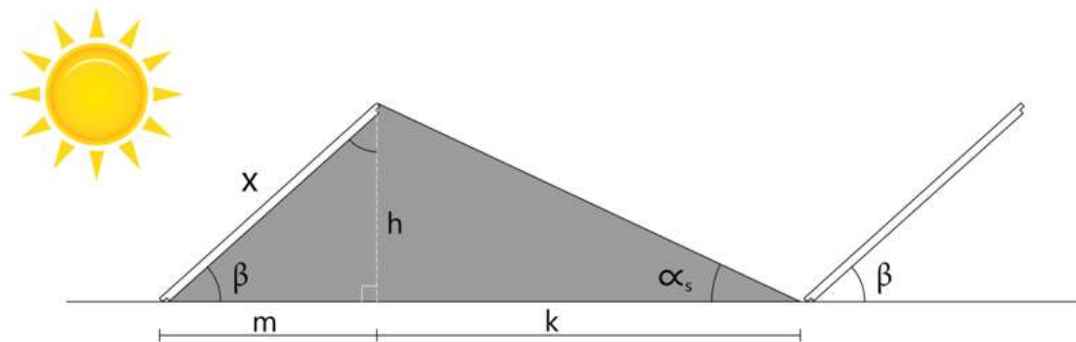
Tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala A_A saatiin kaavan (29) avulla, jossa jäähdytyksen huipputehotunnille tarvittava sähköteho P_j jaettiin invertterin hyötysuhteella ja keskimääräisellä tuntiperusteisella aurinkosähköpaneelin teholla $P_{m,h}$.

$$A_A = \frac{P_j}{\eta_{inv} \cdot P_{m,h}} \quad (29)$$

jossa A_A on aurinkosähköpaneelin pinta-ala.

Jäähdytyksen huipputehotuntien vastaavat aurinkosähköpaneelien pinta-alat laskettiin jokaiselle kulutuspisteryhmälle ja tarkastelukuukaudelle. Varsinaisen aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala pystyttiin laskemaan kun tiedettiin: tarvittavan aurinkosähköpaneelin pinta-ala, tutkimuksessa käytetyn esimerkki aurinkosähköpaneelin pinta-ala, aurinkosähköpaneelien lukumäärä, aurinkosähköpaneelirivien vähimmäisetäisyys ja turvaetäisyydet paneelirivien reunoista. Aurinkosähköpaneelikentän oletettiin olevan neliön muotoinen.

Aurinkosähköpaneelirivien keskinäinen vähimmäisetäisyys toisistaan määräytyi kuvan 1 mukaisesti paneelin kallistuskulman β ja alhaisimman auringon korkeuskulman α_s mukaan. (Duffie et al. 2006, s. 36–37). Tässä tutkimuksessa auringon korkeuskulmana oli 17° . Auringon korkeuskulma 17° aiheuttaa kaikille muille kuin ensimmäiselle aurinkosähköpaneeliriville edelliseltä riviltä aiheutuvan varjostuksen. Hellmanin käytti tutkimuksessaan alhaisimpana auringon korkeuskulmana 5° suoralle auringon säteilyteholle (Hellmann 2011, s. 5). Tässä tutkimuksessa aurinkosähköpaneelin varjostusta auringon korkeuskulman ollessa välillä 5° – 17° ei otettu huomioon.



Kuva 14. Aurinkosähköpaneelirivien vähimmäisetäisyys

Aurinkosähköpaneelirivien vähimmäisetäisyys $(m+k)$ laskettiin trigonometrian avulla.

5.3.2 Jäähdytysenergian tuotanto aurinkosähköpaneelilla tunteina, joina aurinko säteilee ($p_{index} > 0$)

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa selvitettiin, voidaanko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa tarpeeksi jäähdytykseen

tunneilla, jolloin auringon säteilyn $p_{\text{index}} > 0$ (myöhemmin käytetään sanaa *auringon säteilytunnit*). Laskenta tehtiin erikseen jokaiselle tarkastelukuukaudelle ja kulutuspisteryhmälle.

Auringonpaistetunnit saatiin Hellmanin aikasarjoista liitteestä A ja B. Paistetunnit laskettiin yhteen, jolloin saatiin auringon säteily määrä H_A . Jäähdytykseen tarvittava jäähdytysenergian määrä saatiin laskemalla liitteestä B yhteen jäähdytysenergian määrä auringonpaistetunteina.

Aurinkosähköpaneelilla tuotettu sähköenergia H_p on yhden päivän säteily määrä kerrottuna tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa lasketulla aurinkosähköpaneelin pinta-alalla (30).

$$H_p = H_A \cdot A_A \quad (30)$$

jossa H_p on aurinkosähköpaneelilla tuotettu sähköenergia
 H_A on auringon säteily määrä.

Aurinkosähköpaneelista saadulla sähköenergialla saadaan tuotettua jäähdytysenergiaa, kun saatu sähköenergia kerrotaan 4,6:lla (31).

$$E_{\text{jäähdytys}} = H_p \cdot 4,6 \quad (31)$$

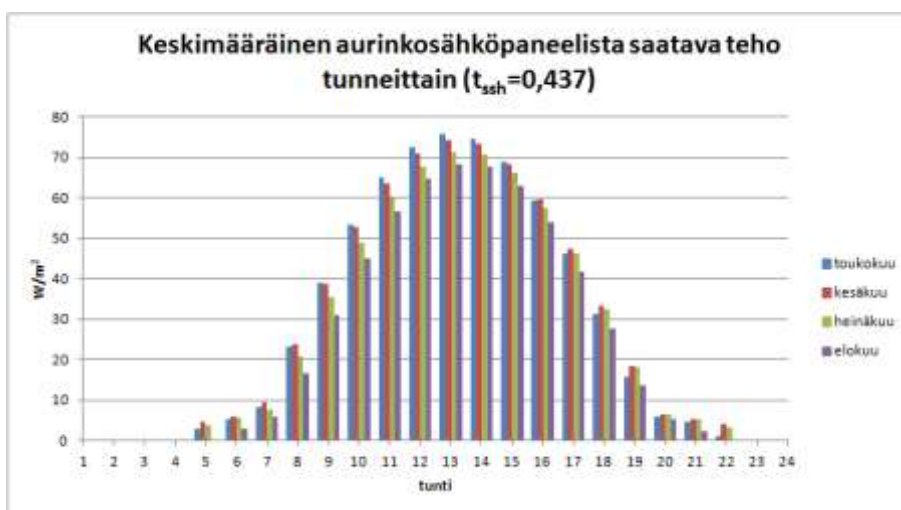
jossa $E_{\text{jäähdytys}}$ on aurinkosähköpaneelilla tuotettu jäähdytysenergia.

6. Tutkimustulokset

Tutkimustulokset luvussa esitellään ensimmäisenä tarvittava aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala, jolla voitiin tuottaa jäähdytyksen huipputehotunnin tarvitsema sähköteho. Toisessa vaiheessa tarkastellaan voitiinko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa riittävästi jäähdytykseen auringonpaistetunteina. Lisäksi arvioitiin aurinkosähköpaneelikentän soveltuvuutta tarkasteltavien kulutuspisteryhmien katoille jäähdytyksen huipputehotunteina sekä vertailtiin kahdella eri auringonpaistetunneilla ($t_{ssh}=0,437$ ja $t_{ssh}=1$) saatuja aurinkosähköpaneelikentän pinta-aloja keskenään.

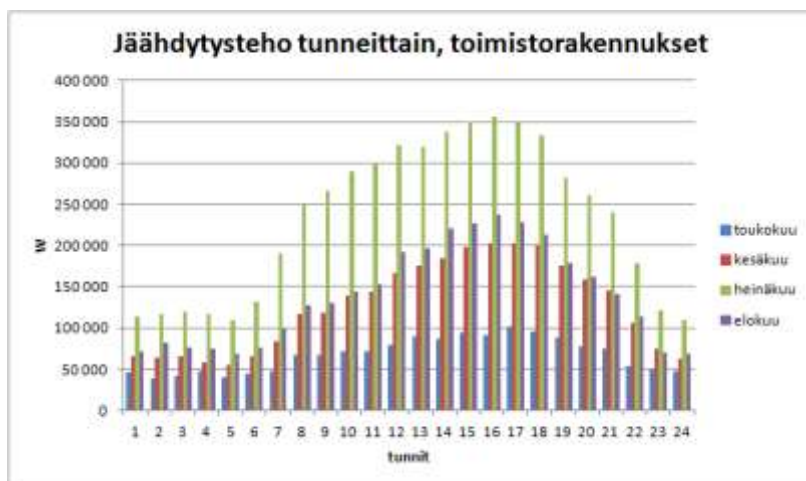
6.1 Aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla

Hellmanin tuntiperusteisen aurinkosähkötuotantomallin avulla luotiin liitteen A arvoja hyödyntäen aurinkosähköpaneelille Q.Pro BLK-G3 250 Wp keskimääräinen aurinkosähköpaneelin teho neliömetrillä tunneittain tarkasteluajanjaksolla, ks. kuva 15. Kuvasta 15 voi havaita, että touko- ja heinäkuun välisenä aikana aurinkosähköpaneelin tuottama teho alkaa aamun tunnilla 04–05 ja tehon tuotto jatkuu tunnille 21–22 asti. Elokuussa vaikutusajat lyhenivät tunnilla sekä aamusta että illasta.

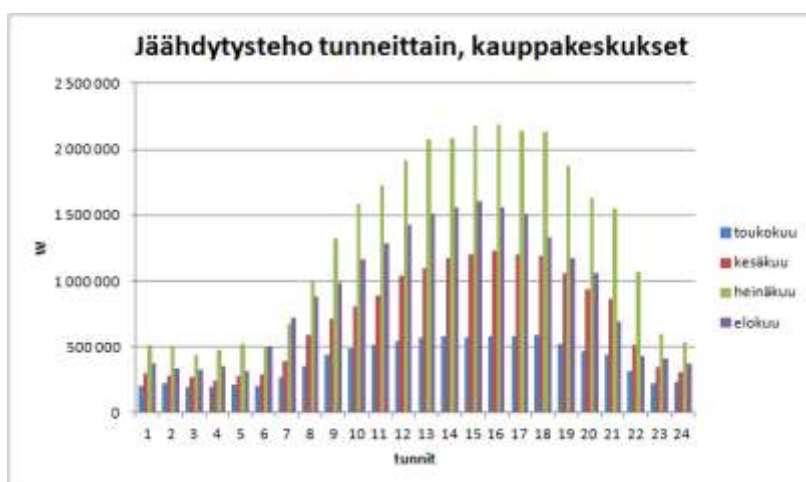


Kuva 15. Keskimääräinen aurinkosähköpaneelin teho tunneittain ($t_{ssh}=0,437$)

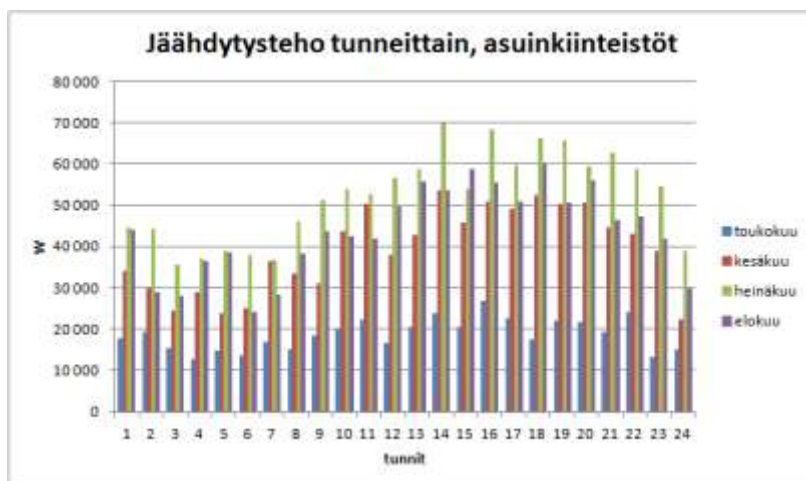
Kuvissa 16–18 on esitetty keskimääräinen jäähdytysteho tunneittain tarkastelukuukausina eri kulutuspisteryhmissä.



Kuva 16. Keskimääräinen jäähdytysteho tunneittain, toimistorakennukset



Kuva 17. Keskimääräinen jäähdytysteho tunneittain, kauppakeskukset



Kuva 18. Keskimääräinen jäähdytysteho tunneittain, asuinkiinteistöt

Taulukossa 6 on esitetty mitatut jäähdytyksen huipputehot ja huipputehotunnit eri kulutuspisteryhmissä. Lisäksi taulukossa on esitetty tarvittavan aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaa kulutuspisteryhmittäin ja tarkasteluukausittain. Taulukossa esitetyllä ”aurinkopaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille”- tuottaa tarvittava sähköteho jäähdytyksen huipputehotunnille.

Taulukko 6. Aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla ($t_{ssh}=0,437$)

toimistorakennukset						
kuukausi	mitattu jäähdytyksen huipputeho kW	jäähdytyksen huipputeho saavutettu tunnilla	tarvittava sähköteho kW	aurinkosähköpaneelin teho jäähdytyksen huipputehotunnilla W/m ²	tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²	aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²
toukokuu	101	17	22	46	476	1 580
kesäkuu	203	17	44	47	930	3 000
heinäkuu	356	16	77	58	1 342	4 277
elokuu	238	16	52	54	960	3 091
kauppakeskukset						
kuukausi	mitattu jäähdytyksen huipputeho kW	jäähdytyksen huipputeho saavutettu tunnilla	tarvittava sähköteho kW	aurinkosähköpaneelin teho jäähdytyksen huipputehotunnilla W/m ²	tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²	aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²
toukokuu	591	18	129	31	4 134	12 826
kesäkuu	1 231	16	268	60	4 498	13 935
heinäkuu	2 186	16	475	58	8 250	25 334
elokuu	1 604	15	349	63	5 554	17 147
asuinkiinteistöt						
kuukausi	mitattu jäähdytyksen huipputeho kW	jäähdytyksen huipputeho saavutettu tunnilla	tarvittava sähköteho kW	aurinkosähköpaneelin teho jäähdytyksen huipputehotunnilla W/m ²	tarvittava aurinkosähköpaneelin pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²	aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnille m ²
toukokuu	27	16	6	59	98	367
kesäkuu	54	14	12	73	159	568
heinäkuu	70	14	15	71	216	752
elokuu	60	18	13	28	477	1 583

Jäähdytyksen huipputehotunnit tarkasteluajanjaksona asettuivat iltapäivän tunneille toimistorakennuksissa ja kauppakeskuksissa. Asuinkiinteistöissä kesä- ja heinäkuun jäähdytyksen huipputehotunnit saavutettiin heti puolen päivän jälkeen. Huipputehotuntien asettuminen iltapäivälle kasvattaa aurinkosähköpaneelien pinta-alaa huomattavasti, koska auringon säteily on iltapäivällä selkeästi vähäisempää verrattuna keskipäivään, kuten kuvasta 15 voitiin havaita.

Taulukosta 6 voidaan huomata, että pinta-ala kasvoi yli kolminkertaiseksi kun aurinkosähköpaneeleista muodostettiin aurinkosähköpaneelikenttä. Tasakattojen reuna-alueille jätettävä suoja-alue sekä varjostuksen huomioon ottaminen kasvattavat aurinkosähköpaneelien tarvitsemaa pinta-alaa keskimäärin lisää toimistorakennuksilla noin 1 000 m², kauppakeskuksilla noin 6 000 m² ja asuinkiinteistöllä noin 250 m². Esimerkkinä mainittakoon, että yksittäisen aurinkosähköpaneelirivin etuseinästä

seuraavan aurinkosähköpaneelirivin etuseinään välinen etäisyys on noin viisi metriä, ks. kuva 14.

Tutkimuksessa jäähdytystehon arvot perustuu mitattuun dataan valituissa kulutuspisteryhmissä. Muissa yhteyksissä jäähdytystehon määrät neliömetrille ovat suurempia kuin tutkimuksen kulutuspisteryhmissä mitattu data. Esimerkiksi Kuluttajatietoisuuden edistämisyhdistys arvioi, että asuinkiinteistöjen jäähdytyksen mitoituksessa tulisi mitoittaa neliömetrille jäähdytystehoa noin 50 W. (Kuluttajatietoisuuden edistämisyhdistys ry 2013). Sisäilmastoratkaisuihin erikoistunut yritys Halton Oy arvioi, että toimistorakennuksilla tarvittava jäähdytysteho neliömetrille olisi noin 60–80 W. (Halton Oy 2014, s. 3). Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tutkija Ranne arvioi, että vanhemmissa toimistorakennuksissa jäähdytystehoa tarvitaan neliömetrille noin 20–44 W (Ranne 2001, s. 25). Koskelainen et al. arvioi, että jäähdytystehon tarve kauppakeskuksissa neliömetrille olisi noin 100–200 W (Koskelainen et al. 2006, s. 550). Tässä tutkimuksessa on käytetty todellista mittausdataa kulutuspisteryhmistä, nämä arvot ovat huomattavasti pienempiä kuin edelle esiteltyjen lähteiden arvot. Tutkimuksessa käytettyjä mitattuja arvoja voi verrata edellisten lähteiden arvoihin taulukossa 7.

Taulukko 7. Jäähdytysteho neliömetrille, tutkimuslähteet ja mitattu jäähdytystehodata

rakennustyyppi	lähteiden mitoitus jäähdytystehoksi W/m²	tutkimuksessa mitattu jäähdytystehodata W/m²
toimistorakennukset	20 - 80	5 - 8
kauppakeskukset	100 - 200	10 - 37
asuinkiinteistöt	50	3 - 7

Voidaan todeta, että jos kulutuspisteryhmien jäähdytystehon mitoitus tapahtuisi edellä mainittujen lähteiden antaman mitoitus jäähdytystehon mukaisesti, kasvattaisi se aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaa huomattavasti.

6.2 Jäähdytysenergian tuotanto auringonpaistettuneina

Toisessa vaiheessa tarkastellaan voitiinko tutkimuksessa lasketulla aurinkosähköpaneelikentän pinta-alalla tuottaa sähköenergiaa riittävästi jäähdytykseen auringonpaistettuneina.

Tutkimuksessa tarkastelujaksona toimi touko-elokuu vuonna 2011. Taulukossa 8 esitellään mitattu jäähdytysenergian käyttö eri kulutuspisteryhmissä tarkastelujaksolla. Tutkimuksessa laskettiin keskiarvoinen jäähdytysenergian kulutus vuoden aikana eri kulutuspisteryhmille, toimistorakennuksissa se oli 37,5 kWh/m², kauppakeskuksissa 77 kWh/m² ja asuinkiinteistöissä 15 kWh/m². Lasketut arvot ovat tyypillisiä keskimääräisiä arvoja jäähdytysenergian kulutukselle, kun niitä verrataan Koskelainen et al.:in ilmoittamiin lukuihin taulukossa 9 (Koskelainen et al. 2006, s. 550).

Taulukko 8. Jäähdytysenergian kulutus kulutuspisteryhmissä kuukaudessa

rakennustyyppi	toukokuu MWh	kesäkuu MWh	heinäkuu MWh	elokuu MWh
toimistorakennukset	50	92	172	103
kauppakeskukset	295	517	969	679
asuinkiinteistöt	14	28	39	33

Taulukko 9. Jäähdytysenergian kulutus neliömetrillä vuodessa

rakennustyyppi	Koskelainen et al. 2006, s. 550 kWh/m ²	tutkimuksen mitattu keskiarvo kWh/m ²
toimistorakennukset	15...50	38
kauppakeskukset	70...150	77
asuinkiinteistöt	10...15	15

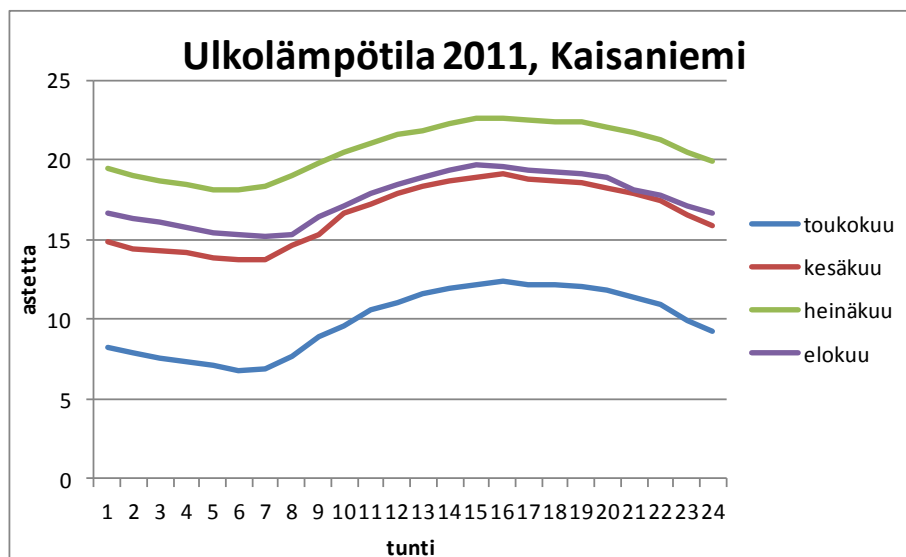
Jäähdytykseen tarvittava jäähdytysenergian määrä saatiin laskemalla liitteestä B yhteen jäähdytysenergian määrä auringonpaistettuneina. Taulukossa 10 on esitelty eri kulutuspisteryhmien jäähdytykseen tarvittavan energian määrä auringonpaistettuneina, jotka touko- heinäkuussa olivat tunnit 04–22 ja elokuussa tunnit 05–21. Lisäksi kyseisestä taulukosta nähdään jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettun aurinkosähköpaneelikentän tuottaman sähköenergian määrä sekä siitä saatava jäähdytysenergian määrä.

Taulukko 10. Jäähdytykseen tarvittavan energian tuotanto auringonpaistettuneina ($t_{ssb}=0,437$)

toimistorakennukset				
kuukausi	jäähdytysenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu sähköenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu jäähdytysenergia kWh	Aurinkosähköpaneelilla tuotetun jäähdytysenergia osuus jäähdytysenergiasta %
toukokuu	1 339	310	1 428	107 %
kesäkuu	2 594	614	2 824	109 %
heinäkuu	4 806	841	3 869	80 %
elokuu	2 652	543	2 497	94 %
kauppakeskukset				
kuukausi	jäähdytysenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu sähköenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu jäähdytysenergia kWh	Aurinkosähköpaneelilla tuotetun jäähdytysenergia osuus jäähdytysenergiasta %
toukokuu	8 125	2 695	12 396	153 %
kesäkuu	15 208	2 968	13 653	90 %
heinäkuu	27 605	5 168	23 775	86 %
elokuu	18 606	3 142	14 454	78 %
asuinkiinteistöt				
kuukausi	jäähdytysenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu sähköenergia kWh	aurinkosähköpaneelilla tuotettu jäähdytysenergia kWh	Aurinkosähköpaneelilla tuotetun jäähdytysenergia osuus jäähdytysenergiasta %
toukokuu	345	64	295	85 %
kesäkuu	751	105	483	64 %
heinäkuu	976	135	622	64 %
elokuu	749	270	1 241	166 %

Kuten taulukosta 10 voidaan havaita, teoreettisesti tarkasteltuna auringonpaistettuneina aurinkosähköpaneelikentällä tuotettu sähköenergia todettiin tutkimuksessa ylijäämäiseksi (ylituotanto). Toisin sanoen, aurinkosähköpaneelikentillä tuotettua energiaa on enemmän tiettyinä kuukausina kuin on jäähdytyksen tuottamiseen tarvittava energiamäärä. Energian ylijäämää esiintyy toimistorakennuksissa touko- ja kesäkuussa, kauppakeskuksissa toukokuussa sekä asuinkiinteistöissä elokuussa.

Toukokuun jäähdytysenergian ylituotantoa voidaan selittää sekä aurinkosäteilyn suuremmalla määrällä sekä samanaikaisesti alemmasta ulkoilmalämpötilasta johtuvalla pienemmällä jäähdytysenergian tarpeella (ks. kuva 19). Taulukosta 10 voidaan havaita, että kaikissa kulutuspiisteryhmissä kesäkuun jäähdytykseen tarvittavan energian kulutus on lähes kaksinkertainen toukokuun vastaavaan kulutukseen verrattuna. Tätä voitaneen selittää kesäkuun kuukauden keskilämpötilan nousulla verrattuna toukokuuhun keskilämpötila arvoihin.



Kuva 19. Ulkolämpötila tarkasteluajanjaksona 2011, Kaisaniemi

Aurinkosähköpaneelikentillä, joiden pinta-ala määritettiin jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan, saavutettiin laskennan mukaan noin 70–90 % jäähdytysenergian päivittäisestä tarpeesta tarkastelukuukausina. Eli jäähdytyksen huipputehon mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala riittää melko hyvin tuottamaan jäähdytyksen tarvitseman sähköenergian auringonpaistetunteina.

6.2.2 Aurinkosähköpaneeleilla tuotetun sähkön ja kulutuspisteryhmistä mitatun sähkönkulutuksen suhde

Tutkimuksessa tarkasteltiin, kulutuspisteryhmien kokonaissähkönkulutuksen ja kulutuspisteryhmiin mitoitettun aurinkosähköpaneelikentän tuottaman sähkötehon suhdetta.

Keskimääräinen aurinkosähköpaneelikentästä saatava sähköteho auringonpaistetunteina suhteessa kulutuspisteryhmän mitattuun kokonaissähkönkulutukseen oli 13–18 %, ks. taulukko 11. Liitteessä E on kuvattu tunti tunnilta aurinkosähköpaneelikentällä tuotetun sähkön ja kulutuspisteryhmän mitatun kokonaissähkönkulutuksen suhde (prosentteina).

Taulukko 11. Keskimääräinen aurinkosähköpaneelikentän saatu sähköteho suhteessa kulutuspisteryhmän mitattuun kokonaissähkönkulutukseen auringonpaistettunneilla

kuukausi	toimistorakennukset	kauppakeskukset	asuinkiinteistöt
	%	%	%
toukokuu	13	17	14
kesäkuu	14	18	15
heinäkuu	14	16	15
elokuu	13	15	14

6.3 Aurinkosähköpaneelikentän pinta-alan soveltuminen kulutuspisteiden katoille jäähdytyksen huipputehotunteina

Tutkimuksessa arvioitiin aurinkosähköpaneelikentän soveltuvuutta (pinta-ala) tarkasteltavien kulutuspisteryhmien katoille auringonpaistettuntien kaksilla vertailuarvoilla ($t_{ssh}=0,437$ ja $t_{ssh}=1$). Kuten aiemmin on kuvattu, aurinkosähköpaneeleista muodostettiin neliön muotoiset aurinkosähköpaneelikentät. Aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala sisälsi turvaetäisyydet katon reunoilta ja aurinkosähköpaneelirivien varjostuksen huomioimisen.

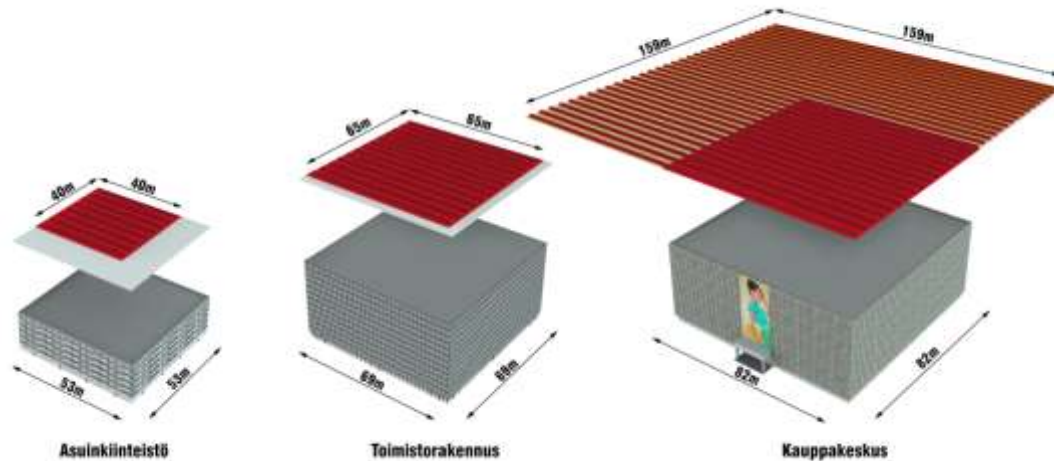
Kulutuspisteryhmien keskimääräiset kattopinta-alat sekä aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla on esitetty taulukossa 12, kun $t_{ssh}=0,437$ ja $t_{ssh}=1$. Lisäksi taulukossa esitetään kulutuspisteryhmien tasakaton pinta-ala suhteessa aurinkopaneelikentän pinta-alaan kahdella eri auringonpaistettunnin arvolla.

Taulukko 12. Tasakaton pinta-ala kulutuspisteryhmissä ja aurinkosähköpaneelikentän pinta-alat, kun $t_{ssh}=0,437$ ja $t_{ssh}=1$

rakennustyyppi	tasakaton pinta-ala m^2	aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla, kun $t_{ssh}=0,437$	aurinkosähköpaneelikentän pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnilla, kun $t_{ssh}=1$	tasakaton pinta-ala suhteessa aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaan, kun $t_{ssh}=0,437$	tasakaton pinta-ala suhteessa aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaan, kun $t_{ssh}=1$
		m^2	m^2	%	%
toimistorakennukset	4 700	4 277	2 579	110 %	182 %
kauppakeskukset	6 700	25 334	15 111	26 %	44 %
asuinkiinteistöt	2 800	1 583	970	177 %	289 %

Kuten taulukosta 12 huomataan, jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä mahtuu toimistorakennusten ja asuinkiinteistöjen katolle molemmilla auringonpaistettuntien arvoilla. Kauppakeskusten katolle jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä ei mahdu. Jäähdytyksen huipputehotunti saavutettiin toimistorakennuksilla ja kauppakeskuksilla heinäkuussa sekä asuinkiinteistöillä elokuussa, ks. taulukko 6. Kuvassa 20 on havainnollistettu

tutkimustulos visuaalisesti kun $t_{ssh}=0,437$. Alla olevassa kuvassa 20 on oikealla kauppakeskus, keskellä toimistorakennus ja vasemmalla asuinkiinteistö.



Kuva 20. Aurinkosähköpaneelikenttien pinta-ala jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan, kun $t_{ssh}=0,437$

Huomioitavaa on, että tarvittavan aurinkosähköpaneelin kokonaispinta-ala pienenee, kun sen hyötysuhde kasvaa. Aurinkosähköpaneelin nimellistehon kaksinkertaistuminen, eli hyötysuhteen muutos esimerkiksi 15 prosentista 30 prosenttiin, puolittaa tarvittavan aurinkosähköpaneelin pinta-alan. Hyötysuhteen paranemisella on siis huomattavia vaikutuksia tarvittavien aurinkosähköpaneelien pinta-alaan ja sitä kautta aurinkosähköpaneelikentän pinta-alaan.

7. Johtopäätökset

Tutkimuksessa todettiin, että jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä mahtuu tarkastelupisteistä toimistorakennusten ja asuinkiinteistöjen katolle. Kauppakeskusten katolle jäähdytyksen huipputehotunnin mukaan mitoitettu aurinkosähköpaneelikenttä ei mahdu. Näin ollen voidaan argumentoida, että jäähdytykseen käytettävä sähköenergia voitaisiin tuottaa aurinkosähköpaneeleilla ainakin osassa kiinteistöistä. Tutkimustulos on paikallinen, eli jäähdytysenergiaa voidaan tuottaa tarkastelun kohteena oleviin kiinteistöihin. Toisaalta tulokset on johdettavissa vastaavanlaisiin kiinteistöihin. Aurinkosähköpaneelein tuotettu jäähdytysenergia ei ole maantieteellisesti sidottu, kuten esim. kaukojäähdytys. Helsingin

kaupungilla on merkittävät poliittiset sitoumukset kasvihuonepäästöjen rajoittamiseksi, joten on merkityksellistä tutkia uusiutuviin energialähteisiin perustuvaa energiantuotantoa. Osa sähköenergiantuotannosta voitaisiin verrattain helposti kattaa aurinkosähköllä.

Tutkielman tarkastelu oli luonteeltaan teoreettinen, joten jatkostutkimuskohteena olisi mielekästä tarkastella esimerkkikohteen kautta empiirisesti jäähdytysenergiaan tarvittavan sähkön tuottamista aurinkosähköllä. Toinen mielekäs tutkimuskohde voisi olla kiinteistöjen seiniin asennettavat aurinkosähköpaneelit, koska kattotila on rajallinen. Kolmantena seikkana olisi mielekästä tarkastella akuston hyödyntämistä aurinkoenergian varastointiin. Paikallisella jäähdytysenergian tuotannolla on merkitystä ilmastomuutoksen hillitsemisen lisäksi myös taloudellisesta näkökulmasta. Mielekästä voisikin olla vertaileva tutkimus, jossa tarkasteltaisiin paikallisesti tuotetun ja kaukojäähdytyksellä tuotetun energian taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Kaukojäähdytykseen liittyy mm. laaja infrastruktuurin rakentaminen.

Paikallinen ja uusiutuviin energialähteisiin perustuva sähköenergian tuottaminen on merkityksellistä, koska ilmastomuutos ja lisääntyvä sähköenergiankysyntä aiheuttavat omat haasteensa. Ilmastokeskustelussa on siedettävä monenlaista epävarmuutta. Kukaan ei voi tarkasti tietää kuinka ilmastomuutos vaikuttaa millekin alueelle. Tärkeää on kuitenkin keskustella eri vaihtoehtoista, joilla voidaan hillitä ilmastomuutosta, sekä toimia ilmastomuutoksen pienentämiseksi. Osana tätä keskustelua ja näitä toimenpiteitä on tärkeää tarkastella uusiutuvien energialähteiden käyttöä osana energiantuotantoa.

Ilmastomuutoksen syyt ovat teknisten ratkaisujen lisäksi yhteiskuntajärjestelmiemme rakenteissa. Ihmisten energiankulutuksella ja elämäntyyliä on tärkeä vaikutus ilmastomuutoksen hillinnässä uusiutuvien energialähteiden lisäksi. Bettencourt et al. esittävät, että kaupunkien tulisi tähdätä ”kierrättäviksi kaupungeiksi”. He argumentoivat, että kaupungin metaboliaan (aineenvaihduntaan) liittyvät fyysiset syötteet kuten vesi, energia ja materiaalit. Syötteet kulutetaan tai muutetaan teknologian avulla tai biologisilla menetelmillä jätteiksi, tavaroiksi tai kaupungin tulosteeksi. Ympäristön kannalta on merkitystä kuinka energiatehokkaasti kaupunki voi toimia. Nykyajan kaupungit toimivat lineaarisesti käyttäen vettä, energiaa ja materiaalia sekä

tuottaen informaatiota, tavaroita, palveluita ja jätteitä (kiinteät sekä ei kiinteä (ilman saasteet)). Tavoitteena kuitenkin voidaan pitää, että kaupunki olisi ”kierrättävä kaupunki”, jossa kaupunki pystyy hyödyntämään fyysiset syötteet niin, ettei jätteitä (kiinteitä ja ei kiinteitä) synny ja samalla kuitenkin pystytään tuottamaan informaatiot, tavarat ja palvelut. (Bettencourt et al. 2007, s. 7302)

Lähdeluettelo

Bettencourt, M. A. & Lobo, J. & Helbing, D. & Kühnert, C. & West, G. B. 2007. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in the city. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). [Verkkolehti]. Vol 104 (17). S. 7301–7306. [Viitattu 26.4.2014]. ISSN-0027-8424. (doi:10.1073/pnas.0610172104).

BrightSource Energy. 2014. Ivanpah plant begins “steam blows” (April 2013). [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://ivanpahsolar.com/photos-and-videos?cat=0>.

Broome, J. 1992. Counting the Cost of Global Warming. White Horse Press: Isle of Harris. 143 s. ISBN: 1-874267-01-4.

Duffie, John A. & Beckman, William A. 2006. Solar engineering of thermal processes. Hoboken, NJ. Wiley. 908 s. ISBN 0-471-69867-9 (inb.), ISBN 978-0-471-69867-8.

Edenhofer, O. et al. 2014. Summary for Policymakers 2014 (final draft). Teoksessa: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. [Verkkojulkaisu]. 15 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://report.mitigation2014.org/spm/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers_approved.pdf.

Energiansäästöneuvottelukunta. 2013. Helsingin kaupungin energiasäästöneuvottelukunnan kokous 4/2013. [Verkkojulkaisu]. 6 s. [Viitattu 19.12.2013]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/esnk/yleisesittely/P%C3%B6yt%C3%A4kirjat2013/ESNK_pk4_2013.pdf.

Energiateollisuus. 2013a. Kaukojäähdytys 2013 graafeina. [Tilastokaavio]. [Viitattu 24.4.2014]. 4 s. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-jajulkaisut/kaukojaahdytys_2013.pptx.

Energiatoteellisuus. 2013b. Kaukojäähdytys v. 2013; tilastotietoja vuodelta 2013, excel-
taulukko. [Tilastotaulukko]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa:
<http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/kj-tilasto2013.xls>.

Euroopan komissio. 2014. Vuoteen 2030 ulottuvat ilmasto- ja energiatavoitteet
kilpailukykyiselle, varmalle ja vähähiiliselle EU:n taloudelle. [Lehdistötiedote].
[Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_fi.htm.

Euroopan unioni. 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU,
annettu 19 päivänä toukokuuta 2010 (uudelleenlaadittu), rakennusten
energiatoteellisuudesta. [Verkkajulkaisu]. 23 s. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa:
[http://eur-lex.europa.eu/legal-
content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=FI](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=FI).

European Commission. 2011. A Roadmap for moving to a competitive low carbon
economy in 2050. Communication from Commission to the European Parliament, the
Council, the European economic and social committee and the committee of the
regions. [Verkkajulkaisu]. 16 s. COM (2011) 112 final. [Viitattu 17.4.2014] Saatavissa:
[http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-
dba649109d18.0002.03/DOC_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/DOC_1&format=PDF).

Flannery, T. 2006. The Weather Makers. The History and Future Impact of Climate
Change. London: Allen Lane. 341 s. ISBN 0-713-99921-7 (sid.). ISBN 978-0-713-
99921-1 (sid.).

Fläkt Woods Oy. 2010. Combi cooler. [Verkkodokumentti]. 8 s. [Viitattu 19.12.2013].
Saatavissa: <http://www.flaktwoods.fi/bf6b75d3-ee3c-4996-a8f6-524c4157ad73>.

Halton Oy. 2014. Palkkijärjestelmän suunnitteluopas. [Verkkodokumentti]. 30 s.
[Viitattu 14.1.2014] Saatavissa:
[http://www.halton.fi/halton/fi/cms.nsf/files/A244D69237D70BB3C225728E00669968/
\\$file/palkkisuunnitteluopas.pdf](http://www.halton.fi/halton/fi/cms.nsf/files/A244D69237D70BB3C225728E00669968/$file/palkkisuunnitteluopas.pdf).

Hanwha Q Cells. 2013. Q.PRO-G3 250-270. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 19.12.2013]. Saatavissa: http://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPRO-G3_250-270_2013-09_Rev03_AU_01.pdf.

Hellman, H-P. 2011. Photovoltaic power generation modeling. Aalto University School of Electrical Engineering. Espoo. 68 s.

Helsingin Energia. 2014. Hiilineutraali tulevaisuus [Verkkosivu]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: http://www.helen.fi/pdf/Helen_2020_kehitysohjelma.pdf.

Helsingin kaupungin ympäristökeskus. 2012a. Energiankulutus sektoreittain pääkaupunkiseudulla 1990–2012. [Tilastokaavio]. Muuttujina: kunta, sektori, muuttuja, laskentatapa ja vuosi. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: <http://www.helsinginymparistotilasto.fi/>.

Helsingin kaupungin ympäristökeskus. 2012b. Helsingin, Espoon, Kauniaisten ja Vantaan kulutusta vastaavat kasvihuonekaasupäästöt 1990–2012. [Tilastokaavio]. Muuttujina Kunta, Sektori, Muuttuja ja Vuosi. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: <http://www.helsinginymparistotilasto.fi/>.

Helsingin kaupungin ympäristökeskus. 2012c. Helsingin Kaisaniemen mittausaseman vuosikeskilämpötilat 1829–2013. [Verkkokuva]. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.helsinginymparistotilasto.fi/GRAPH/Graphpage.aspx?ma=I3_keskilampotilat&path=../QUICKTABLES/00KUVIOT/ILMASTONMUUTOS/&ssid=1404171357405&Gedit=False&case=qt#top.

Helsingin kaupunki. 2008. Helsingin kaupungin energiapoliittisia linjauksia. [Verkkojulkaisu]. 45 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hel2/ajankohtaista/energiapolitiikka.pdf>.

Helsingin kaupunki. 2012. Helsingin kaupungin ympäristöpolitiikka. [Verkkojulkaisu]. 8 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/e3faf1004a158b94a843ecb546fc4d01/Ymparistopo>

litiikka_kvsto+hyvaksyma.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=e3faf1004a158b94a843ecb546fc4d01.

Helsingin kaupunki. 2013. Strategiaohjelma 2013–2016. [Verkkajulkaisu]. 67 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/taske/julkaisut/2013/Strategiaohjelma_2013-2016_Kh_250313.pdf.

Honkapuro, S. & Jauhiainen, N. & Partanen, J. & Valkealahti, S. 2009. Sähkön ja kaukolämmön rooli energiatehokkuudessa ja energian säästössä. [Verkkoraportti]. Tampereen teknillinen yliopisto, sähköenergian laitos ja Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Viitattu 10.4.2014]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/sahko_ja_kaukolampo_energiatehokkuudessa_20091112_0.pdf.

Härmälä, E. & Kuuva, P. 2014. Suomen energia- ja ilmastopolitiikka perustuu eri ministeriöiden yhteistyöhön. Helsingin Sanomat. N:o 70. B11.

IVT Lämpöpumput Oy. 2009. IVT Aurinko. [Verkkodokumentti]. 40 s. [Viitattu 19.12.2013]. Saatavissa: http://www.ivt.fi/upload/fi/pdf/IVT_Kerain_FKT-1_Tasakatto_asennus.pdf.

Joint Research Centre. 2006. Photovoltaics Solar Electricity Potential in European Countries. [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_opt/pvgis_Europe-solar_opt_publication.png.

Jylhä, K. & Ruosteenoja, K. & Räisänen, J. & Venäläinen, A. & Ruokolainen, L. & Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos raportteja. [Verkkolehti]. 2009:4. S. 37–38. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/15711/2009nro4.pdf?sequence=1>. ISBN 978-951-697-699-3 (nid.). ISBN 978-951-697-700-6 (pdf).

Kalogirou, Soteris A. 2009. Solar Energy Engineering - Processes and Systems. Burlington, MA. Elsevier/Academic Press. 779 s. ISBN 978-0-12-374501-9 (painettu). ISBN 978-0-08-092287-4 (sähköinen).

Kortetmäki, T. 2013. YK:n ilmastokokousten eettiset kysymykset. Teoksessa: Laitinen, A. & Yrjönsuuri, M. (toim.) Ajatuksia ilmastoetiikasta. Kirjoittajat ja Jyväskylän yliopisto. S. 81. © 2013 ISSN 1238-8025. ISBN 978-951-39-5279-2 (pdf).

Koskelainen, L. & Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-98-1.

Kuluttajätietoisuuden edistämisyhdistys ry. 2013. Ostajan opas: ilmalämpöpumput. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.1.2014] Saatavissa: <http://www.kuluttaja.fi/fi-FI/ostajan-opaat/ilmalampopumput/muistilista/>.

Leppänen, J. 2013. Aurinkosähköä. Sähkö & Tele. 3-4/2013. [Verkkajulkaisu]. 45 s. ISSN 0789-676X.

Lounasheimo, J. 2013. Päästöjen kehitys 2012. Pääkaupunkiseudun ilmastoraportti. [Verkkajulkaisu]. 10/2013. 112 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.hsy.fi/tietoahsy/Documents/Julkaisut/10_2013_pks_ilmastoraportti_2012.pdf. ISSN 1798-6095 (pdf). ISBN 978-952-6604-77-0 (pdf).

Mattei, M. & Notton, G. & Cristofari, C. & Muselli, M. & Poggi P. 2006. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. Renewable Energy. [Verkkolehti]. Vol. 31:4, S. 553–567. [Viitattu 9.4.2014]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810500073X>. ISSN 0960-1481.

Mielonen, M. 2014. Aurinkosähkön aika on nyt Helsingin Sanomat. N:o 97. B8.

Naps Systems Oy. 2013a. Modules for special solar glazing. [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.napssystems.com/wordpress/products/solar-panels/glass-glass-modules/>.

Naps Systems Oy. 2013b. Vaisalan pääkonttori. [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.napssystems.com/wordpress/wp-content/uploads/2013/11/Case-Introduction-Grid-Vaisala-Headquarters-Finland-FI.pdf>.

NIBE AB. 2011. Asentajan käsikirja. [Verkkodokumentti]. 76 s. [Viitattu 19.12.2013]. Saatavissa: <http://www.nibeonline.com/pdf/031971-1.pdf>.

Nurmijärven Sähkö Oy. Nurmijärven Sähkön aurinkopaneelit. [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.nurmijarvensahko.fi/fi/aurinkopaneelit>.

Paavola, M. 2013. Verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: http://www.tampere.fi/material/attachments/v/6HSsw1Wei/Diplomityo_Paavola_painettuversio.pdf.

Rakennusvalvontavirasto. 2010. Helsingin kaupungin rakennusjärjestys. [Verkkodokumentti]. 14 s. [Viitattu 19.12.2013]. Saatavissa: http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/3b7175804437405091b4913e564265af/Uusi_rakennusjarjestys_2010_11_01.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=3b7175804437405091b4913e564265af.

Ramboll Oy. 2013. Tampere-talon laajennusosan aurinkoenergieselvitys/RESCA. 80 s. [Verkkodokumentti]. Loppuraportti. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: http://www.tampere-talo.fi/uploads/Aurinkoenergia_loppuraportti_Tampere-talo.pdf.

Ranne, A. 2001. Multi Supply Plant. Sähkö ja kylmä. [Verkkojulkaisu]. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 114 s. [Viitattu 14.1.2014] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2097.pdf>. ISBN 951-38-5826-X (painettu). ISBN 951-38-5827-8 (sähköinen).

Rautaruukki Oyj. 2014. Liberta™ Solar –aurinkopaneelijulkisivu. Ruukki kuvapankki. [Verkkokuva]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://ruukki.digtator.fi/Default.aspx>.

Rigollier, C. & Bauer, O. & Wald, L. 2000. On the clear sky model of the ESRA – European Solar Radiation Atlas – with respect to the Heliosat method. Solar Energy. [Verkkolehti]. Vol. 68:1. S. 33–48. [Viitattu 9.4.2014]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X99000559>. ISSN 0038-092X.

Saavalainen, H. 2014a. Halpa kivihiili jyrää turpeen ja hakkeen. Helsingin Sanomat. N:o 102. A7.

Saavalainen, H. 2014b. IPCC vaatii hiiliriippuvuuden katkaisua. Helsingin Sanomat. N:o 102. A8.

Suntekno Oy. 2010. Aurinkopaneelin toimintaperiaate. [Verkkodokumentti]. 9 s. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>.

Suomen kaukolämpö ry. 2004. Kaukojäähdytys. [Verkkojulkaisu]. 36 s. [viitattu 20.12.2013]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/raporttij1_2004.pdf. ISSN 1795-0627 (painettu). ISSN 1795-0635 (sähköinen).

Tietokeskus. 2013. Helsingin tilastollinen vuosikirja 2013. [Verkkojulkaisu]. 101. vuosikerta. 320 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/13_12_30_Tilastollinen_vuosikirja_2013.pdf. ISSN-L 0785-8736 (painettu). ISSN 1799-5264 (sähköinen).

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013a. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Energia ja ilmasto. [Verkkojulkaisu]. 8/2013. 53 s. [Viitattu 17.4.2014] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/36730/Energia-_ja_ilmastostrategia_2013_SUOMENKIELINEN.pdf. ISBN 978-952-227-750-3 (sähköinen). ISBN 978-952-227-749-7 (painettu).

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013b. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia: Taustaraportti. [Verkkojulkaisu]. 179 s. [Viitattu 17.4.2014] Saatavissa:

http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf.

United Nations. 1992. United Nations framework convention on climate change. [Verkkodokumentti]. 25 s. [Viitattu 18.4.2014]. Saatavissa: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.

Vihavainen, M. 2014. Rakentaminen Helsingissä 2013 sekä rakentamisen aikasarjoja. Helsingin kaupungin tietokeskus: Tilastoja. [Verkkojulkaisu]. 2014:8. 9 s. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/14_02_18_Tilastoja_8_Vihavainen.pdf. ISSN-L 1455-7231. ISSN 1796-721X.

Yhdistyneet kansakunnat. 2013. Kehitys – kestävä kehitys. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.yk.fi/node/470>.

Ympäristöministeriö. 2012. Rakennusten energiatehokkuus; määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. [Verkkodokumentti]. 35 s. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: http://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/D3-2012_S.pdf.

YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta. 2007. Pääkaupunkiseudun ilmastostrategia 2030. [Verkkolehti]. YTV:n julkaisu 24/2007. [Viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: http://www.hsy.fi/seututieto/Documents/YTV_julkaisusarja/24_2007_ilmastostrategia.pdf. ISSN 1796-6965. ISBN 978-951-798-660-1 (nid.). ISBN 978-951-798-661-8 (pdf).

Zaitseva, K. 2012. Aurinkosähkijärjestelmien, elektronisesti kommutoitujen tasavirtamoottoreiden ja LED-valaistuksen käytön vaikutus rakennusten sähkön laatuun. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu, Espoo. [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100628.pdf>.

A_{pindex} (W/m²), $t_{ssh}=0,437$

M/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,2	132	212	254	253	209	129	19,2	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	27,7	167	287	373	417	419	379	297	182	40,4	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0,87	39	154	278	385	459	496	494	453	377	271	148	34,1	0	0	0	0	0
A	0	0	0	0	0	10,8	35,7	117	233	344	434	495	522	515	474	402	303	191	82	28,7	2,62	0	0	0
M	0	0	0	0	19,7	36,8	58,1	162	272	373	453	505	528	519	480	413	322	217	109	40,4	31,6	7,61	0	0
Jn	0	0	0	0	32,4	40,7	64,9	166	271	367	443	495	518	511	477	415	331	232	128	44,8	37,1	29,1	0	0
Jl	0	0	0	0	26,5	38,7	52,7	145	247	341	418	471	496	492	461	402	322	226	127	45,4	36,3	22,4	0	0
A	0	0	0	0	0	20,7	40,5	115	216	314	395	451	477	472	438	376	291	192	95,5	37,2	16	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	14,9	76,7	176	280	365	422	446	436	393	320	225	122	37,8	4,53	0	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0	12,8	101	205	295	353	374	358	306	222	120	24,2	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8	90,5	196	262	287	270	211	120	7,86	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	149	229	265	254	195	62,5	0	0	0	0	0	0	0	0

B p_{index} (W/m^2), $t_{\text{ssh}}=1$

M/h	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,8	214	355	430	428	349	207	29,1	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	42	276	486	633	709	712	643	504	303	62,4	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0,76	54,4	252	472	654	777	838	834	768	641	459	243	45,9	0	0	0	0	0
A	0	0	0	0	0	10,5	39,9	188	392	584	736	835	878	866	799	680	515	319	124	30,2	2,34	0	0	0
M	0	0	0	0	19,3	42,3	81,1	267	461	633	764	848	883	868	806	697	546	364	174	49,8	33,7	6,95	0	0
Jn	0	0	0	0	34,9	50,1	94	275	459	622	747	829	865	855	800	701	561	391	208	58,2	44	29,4	0	0
Jl	0	0	0	0	26,8	46,7	72,1	238	416	578	705	790	829	823	773	679	545	381	206	59,6	43	22	0	0
A	0	0	0	0	0	21,5	49,8	185	364	533	668	759	800	792	737	635	492	322	150	44,5	16,3	0	0	0
S	0	0	0	0	0	14,9	14,9	115	293	473	619	713	752	735	665	543	379	198	49,8	4,3	0	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0	16,2	158	344	500	599	635	608	519	374	192	33,8	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	0	2,44	143	327	443	487	456	353	192	11	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	244	385	449	429	326	97,9	0	0	0	0	0	0	0	0

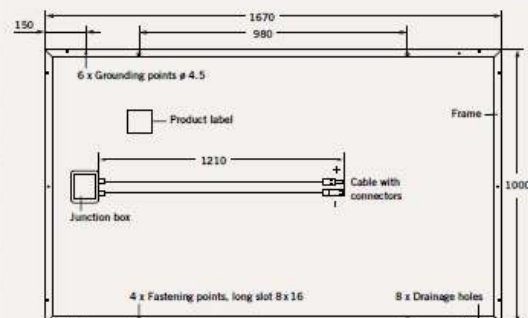
C Jäähdytysteho (kW) tunneittain

toimistorakennukset						kauppakeskukset						asuinkeinteistöt					
tunnit	toukokuu kW	kesäkuu kW	heinäkuu kW	elokuu kW		tunnit	toukokuu kW	kesäkuu kW	heinäkuu kW	elokuu kW		tunnit	toukokuu kW	kesäkuu kW	heinäkuu kW	elokuu kW	
1	47	65	114	71		1	206	293	516	372		1	18	34	45	44	
2	38	64	117	82		2	218	281	497	338		2	19	30	44	29	
3	42	65	120	76		3	198	271	435	323		3	15	25	35	28	
4	48	58	117	74		4	194	239	480	354		4	13	29	37	36	
5	41	55	109	69		5	217	282	523	318		5	15	24	39	39	
6	45	65	132	77		6	200	289	505	505		6	14	25	38	24	
7	48	83	190	98		7	273	396	673	726		7	17	37	37	28	
8	67	117	249	128		8	353	590	991	882		8	15	33	46	38	
9	67	119	266	130		9	437	710	1326	988		9	18	31	51	44	
10	72	139	289	144		10	486	809	1589	1159		10	20	44	54	42	
11	72	144	300	153		11	511	887	1731	1284		11	22	50	53	42	
12	79	167	321	192		12	545	1040	1917	1424		12	17	38	57	50	
13	90	176	320	196		13	569	1098	2081	1513		13	21	43	59	56	
14	86	185	339	220		14	578	1176	2085	1563		14	24	54	70	54	
15	95	198	350	227		15	575	1201	2183	1604		15	20	46	54	59	
16	92	203	356	238		16	584	1231	2186	1562		16	27	51	68	55	
17	101	203	349	228		17	577	1202	2143	1510		17	23	49	60	51	
18	95	202	333	213		18	591	1194	2137	1335		18	18	53	66	60	
19	88	176	283	178		19	526	1064	1878	1174		19	22	50	66	50	
20	77	159	262	162		20	467	933	1632	1058		20	22	51	59	56	
21	75	146	241	141		21	442	867	1545	689		21	19	45	63	46	
22	54	106	178	114		22	322	511	1071	434		22	24	43	59	47	
23	50	75	122	70		23	220	344	597	412		23	13	39	55	42	
24	48	63	109	69		24	228	310	534	377		24	15	22	39	30	

D Aurinkosähköpaneeli Q.Pro BLK-G3 250 W_p

MECHANICAL SPECIFICATION

Format	1670 mm x 1000 mm x 35 mm (including frame)
Weight	19 kg
Front Cover	3.2 mm thermally pre-stressed glass with anti-reflection technology
Back Cover	Composite film
Frame	Anodised aluminium
Cell	6 x 10 polycrystalline solar cells
Junction box	110 mm x 115 mm x 23 mm Protection class IP67, with bypass diodes
Cable	4 mm ² Solar cable; (+) 1210 mm, (-) 1210 mm
Connector	SOLARLOK PV4, IP68



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS (STC: 1000 W/m², 25 °C, AM 1.5 G SPECTRUM)¹

NOMINAL POWER (+5 W/-0 W)		[W]	250	255	260	265	270
Average Power	P _{MPP}	[W]	252.5	257.5	262.5	267.5	272.5
Short Circuit Current	I _{sc}	[A]	8.71	8.90	9.09	9.28	9.47
Open Circuit Voltage	V _{oc}	[V]	37.49	37.83	38.18	38.52	38.86
Current at P _{MPP}	I _{MPP}	[A]	8.21	8.37	8.53	8.69	8.85
Voltage at P _{MPP}	V _{MPP}	[V]	30.76	30.77	30.78	30.79	30.80
Efficiency (Nominal Power)	η	[%]	≥15.0	≥15.3	≥15.6	≥15.9	≥16.2

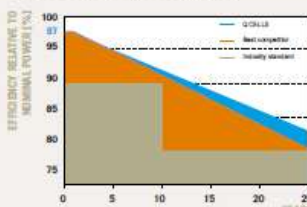
PERFORMANCE AT NORMAL OPERATING CELL TEMPERATURE (NOCT: 800 W/m², 45 ±3 °C, AM 1.5 G SPECTRUM)²

NOMINAL POWER (+5 W/-0 W)		[W]	250	255	260	265	270
Average Power	P _{MPP}	[W]	186.0	189.7	193.4	197.1	200.8
Short Circuit Current	I _{sc}	[A]	7.03	7.18	7.33	7.48	7.63
Open Circuit Voltage	V _{oc}	[V]	34.68	34.99	35.31	35.63	35.95
Current at P _{MPP}	I _{MPP}	[A]	6.44	6.56	6.68	6.80	6.93
Voltage at P _{MPP}	V _{MPP}	[V]	28.89	28.92	28.94	28.97	28.99

¹ Measurement tolerances STC: ±3% (P_{MPP}); ±10% (I_{sc}, V_{oc}, I_{MPP}, V_{MPP})

² Measurement tolerances NOCT: ±5% (P_{MPP}); ±10% (I_{sc}, V_{oc}, I_{MPP}, V_{MPP})

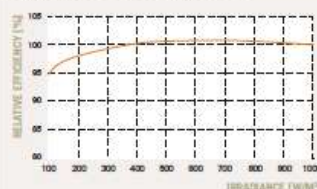
Q CELLS PERFORMANCE WARRANTY



At least 97 % of nominal power during first year. Thereafter max. 0.6 % degradation per year.
At least 92 % of nominal power after 10 years.
At least 83 % of nominal power after 25 years.

All data within measurement tolerances.
Full warranties in accordance with the warranty terms of the Q CELLS sales organisation of your respective country.

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE



The typical change in module efficiency at an irradiance of 200 W/m² in relation to 1000 W/m² (both at 25 °C and AM 1.5 G spectrum) is -2 % (relative).

TEMPERATURE COEFFICIENTS (AT 1000 W/m², 25 °C, AM 1.5 G SPECTRUM)

Temperature Coefficient of I _{sc}	α	[%/K]	+0.04	Temperature Coefficient of V _{oc}	β	[%/K]	-0.33
Temperature Coefficient of P _{MPP}	γ	[%/K]	-0.42				

PROPERTIES FOR SYSTEM DESIGN

Maximum System Voltage V _{sys}	[V]	1000	Safety Class	II
Maximum Reverse Current I _r	[A]	20	Fire Rating	C
Wind/Snow Load (in accordance with IEC 61215)	[Pa]	5400	Permitted module temperature on continuous duty	-40 °C up to +85 °C

E Aurinkosähköpaneelientältä tuotetun sähkön ja kulutuspisteryhmän mitatun kokonaissähkönkulutuksen suhde (prosentteina)

